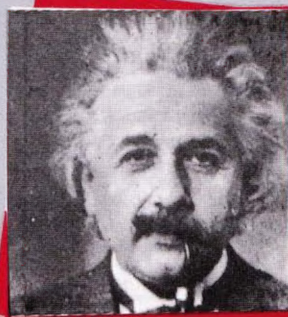
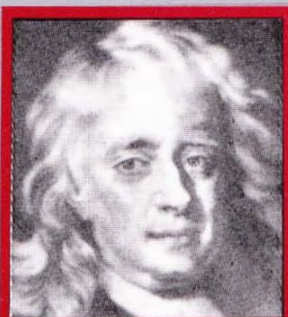
سلسلة الثقافة المميزة
6

قصة الفيزياء

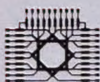
تأليف
لويد مُتز و جيفرسون هين وِيڤر



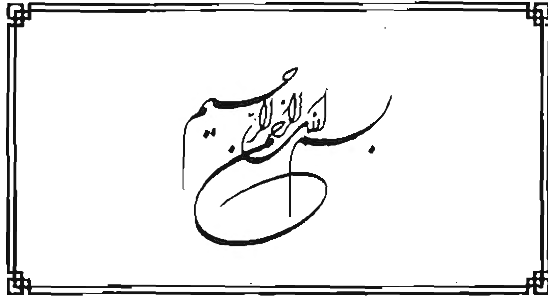





ترجمة عن الإنكليزية
د. طاهر تربدار و وائل الأتاسي



المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا





دار طـــــلاس
للدراسات والترجمة والنشر

دمشق - اوتستراد المزة. ص.ب: ١٦٠٣٥
هاتف : ٦٦١٨٠١٣ - ٦٦١٨٩٦١
تلفاكس : ٦٦١٨٨٢٠ - برقياً : طلاسدار

رَيـع الـدّار
لهيئة مدارس أبناء وبنات الشهداء في الجمهورية العربية السورية

قصة الفيزياء

عنوان الكتاب باللغة الإنكليزية

The Story of Physics

صدر هذا الكتاب بالتعاون مع المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بدمشق

الطبعة الثانية - ١٩٩٩

تأليف

لويد مُتْز و جيفرسون هين وِيڤر

قصة الفيزياء

ترجمه عن الإنكليزية

د. طاهر تربدار و وائل الأتاسي



تـنـويــه

لقد أورد مؤلفا الكتاب حاشية واحدة أشير إليها بالرمز □ ، وقد رأينا من المفيد إضافة عدد آخر من الحواشي. كما ألمعنا في ـ" كلمة المترجمين ـ إلى فضل العرب والمسلمين على علم الفيزياء والفلك ، إذ خلا الكتاب من إسهامهم كأمثاله من الكتب الغربية .



أعمال الدكتور طاهر تربدار المنشورة

الكتب المؤلفة

١ ــ الاهتزازات والأمواج (٢) منشورات جامعة دمشق ١٩٨٣ ، ١٩٨٧ ، ١٩٩٤ .

٢ ــ الضوء الهندسي ، منشورات جامعة دمشق ١٩٨٢ ، ١٩٨٧ .

٣ ــ تجارب في الفيزياء العامة ، منشورات جامعة دمشق ١٩٨٣ ، ١٩٨٧ ، ١٩٩٢ .

٤ ــ تجارب في الاهتزازات والأمواج (٢) ، منشورات جامعة دمشق ١٩٨٣ ، ١٩٨٨

٥ ــ تجارب في الاهتزازات والأمواج (١) ، (مشاركة) ، منشورات جامعة دمشق ١٩٩٠ .

٦ ــ الاهتزازات والأمواج (١) ، (مشاركة) ، منشورات جامعة دمشق ١٩٨٢ ، ١٩٨٨ ، ١٩٩٤ .

٧ ــ مسائل محلولة في الضوء والفيزياء الحديثة ، (مشاركة) ١٩٧٤ .

٨ ــ تجارب في الفيزياء ، (مشاركة) ١٩٧٢ .

الكتب المترجمة

٩ ــ الأخيلة الضوئية (جزءان) عن الفرنسية ، (مشاركة) ١٩٧١ .

١٠ ــ الضوء (جزءان) عن الفرنسية ، (مشاركة) ١٩٧٥ .

١١ ــ الاهتزازات،الانتشار والانتثار عن الفرنسية ١٩٧٩ .

١٢ ــ الفيزياء النظرية (جزءان) عن الإنكليزية ، (مشاركة) ١٩٦٩ ، ١٩٧٠

١٣ ــ جزء من الفيزياء الأساسية عن الإنكليزية ، (مشاركة) ١٩٧٤ .

١٤ ــ قصة الفيزياء ، (مشاركة) ١٩٩٤ .



أعمال الأستاذ وائل الأتاسي المترجمة والمنشورة

١ ــ نظرية الكم وقصتها الغريبة ، هيئة الطاقة الذرّية ١٩٩٣ .

٢ ــ التطورات والسلوك الحيواني ، (مشاركة) ، وزارة الثقافة ١٩٨٤ .

٣ ــ الوراثة وتاريخ الحياة ، (مشاركة) وزارة الثقافة ١٩٨٤ .

٤ ــ الكائنات الحية ، (مشاركة) وزارة الثقافة ١٩٨٤ .

٥ ــ الطبيعة ، (مشاركة) وزارة الثقافة ١٩٨٤ .

٦ ــ الداروينية كما تُرى اليوم ، وزارة الثقافة ١٩٨٤ .

٧ ــ الدقائق الثلاث الأولى ، وزارة الثقافة ١٩٨٦ .

٨ ــ علماء واكتشافات ، وزارة الثقافة ١٩٨٦ .

٩ ــ قصة الفيزياء ، (مشاركة) ١٩٩٤ .



كلمة المترجمين

كتاب قصة الفيزياء اجتمعت في مؤلفيْه المواهب اللازمة لكتابة القصة التي يرويانها، فأولهما لويْد مُتز *Lloyd Motz* أستاذ الفيزياء والفلك في جامعة كولومبيا بالولايات المتحدة الأمريكية،وثانيهما جيفرسون هين ويفر *Jefferson Hane Weaver* كاتب علمي معروف. ويحكي الكتاب قصة الفيزياء منذ ألفيْ عام حتى يومنا هذا، وهو دقيق في محتواه لكنه لا يخلو من العيب الشائع في معظم أمثاله من الكتب الغربية. فهو يكاد يقتصر فيما يروي على عمل اليونانيين (الأغريق) والأوربيين والأمريكيين المعاصرين وينسى إسهام حضارات قديمة كحضارة المصريين والبابليين والهنود والصينيين، كما اكتفى بالقول عن العصور الوسطى، التي سبقت عصر النهضة في أوربة، إنها عصور ظلام من غير أن يذكر ما أسهمت به الحضارة العربية الإسلامية في تلك العصور. وليس صحيحاً أن الغرب انقطع عن الفلاسفة اليونانيين كل هذا الانقطاع بل الصحيح أنه اتصل بالفلاسفة والعلماء العرب والمسلمين من طرق كثيرة فاكتشف المنهج التجريبي الحسي؛ ولا نغالي كثيراً إذا قلنا إن أولى أدوات التجربة والاختبار قد صُنعت في العصور الوسطى على أرض الوطن العربي الإسلامي، فلم يُذكر أن أحداً من اليونانيين قد ابتكر وسائل لإجراء التجارب على نحو ما فعل العلماء العرب ولا سيما في مجال الضوء كالتي ابتكرها ابن الهيثم، وهو أبو علي الحسن بن الهيثم. عُرف باسم الهازن *Alhazen* عند الغربيين في العصور الوسطى. ولد بالبصرة عام *965* م وتوفي بالقاهرة عام *1040* م، وقد ذُكر له ما يقرب من مئتيْ كتاب ورسالة في الرياضيات والفلك والطبيعيات والفلسفة والطب. وأهم تصانيفه كتاب «المناظر» الذي تُرجم إلى اللاتينية عام *1572*، وكان لهذا الكتاب أثر بالغ في معارف الغربيين، ويكاد يكون مؤكداً أن نيوتن قد اطلع على أعمال ابن الهيثم لأن مرشد نيوتن وراعيه بارو (الذي ورد ذكره في هذا الكتاب) كان ممن اطلعوا

على هذه الأعمال ولا سيما على منهجه التجريبي وعلى أسلوبه الاستنتاجي الرياضي الذي أضاف إليه نيوتن جرأته في وضع الفرضية، ويحتمل جداً أن يكون قد اقتبس نظريته في الإصدار (التي تقول إن الضوء يتألف من جسيمات صغيرة) من تشبيه ابن الهيثم لانعكاس الضوء عن المرايا الصقيلة بسقوط الكرات التامة المرونة على سطح صقيل صلب وارتدادها عنه، كما لا يُستبعد أن يكون كبار علماء عصر النهضة قد تأثروا بمنهج ابن الهيثم في التحليل والتجربة والاستدلال الرياضي.

ولا يقتصر فضل ابن الهيثم على ذلك، بل هو أول من أعطى أدلة قاطعة على أن للضوء كياناً موضوعياً وأنه لذلك ينتشر في زمان (أي أن له سرعة محدودة) وأنه ينتشر في خطوط مستقيمة. وقد ابتكر كثيراً من الأدوات لإثبات صحة آرائه هذه التي سبقه إليها أبو يوسف يعقوب بن إسحق الكندي (*801-867*م). وسار على نهجه البيروني؛ كما درس ابن الهيثم الإدراك البصري وأعطى أول وصف صحيح للعين ونبه إلى أوهام البصر وفسر كيف تُرى الأشياء البعيدة صغيرةً، كما حاول تفسير لماذا يبدو القمر كبيراً عند الأفق وصغيراً في كبد السماء، ولذلك كله يُعدُّ ابن الهَيثم أقرب العلماء القدماء إلى صورة الفيزيائي، بمفهومه الراهن.

ومن العلماء العرب البيروني وهو محمد بن أحمد أبو الريحان؛ ولد عام *973*م في إقليم خوارزم وتوفي عام *1051*م. كان البيروني ضليعاً في علوم الرياضيات والطبيعيات والفلك والفيزياء؛ وتميز في علوم الجغرافية والتاريخ والتقاويم وفي الفلسفة والأدب. وقد برع البيروني في علم السوائل وأسهم بنصيب وافر فيه، فشرح بعض الظواهر التي تتعلق بضغوط السوائل وتوازنها، وعلّل صعود مياه النافورات والعيون إلى أعلى، وتجمّع مياه الآبار بالرشح من الجوانب حيث يكون مأخذها من المياه القريبة منها. وبهذا الاعتبار يمكن القول إنه طليعة الذين وضعوا بعض القواعد الأساسية فيما يسمى علم توازن السوائل.

على أن أعظم سبق علمي حققه البيروني يظهر دون شك في تحديده الثقل النوعي لعدد من المعادن والأحجار تحديداً دقيقاً يقترب جداً من التقديرات الحديثة؛ فقد عرف قاعدة أرخميدس واستخدمها أحسن استخدام. ولئن اكتشف أرخميدس قوانين الثقل النوعي فإن البيروني وغيره من العلماء العرب قد

تعمقوا في الموضوع وتوصلوا إلى استخراج الثقل النوعي لكثير من الأجسام الصلبة والسوائل، وكانت النتائج التي حصلوا عليها لا تختلف عما توصل إليه العلماء في الوقت الحاضر إلا اختلافاً يسيراً جداً سببه تقدم وسائل البحث.

وقد جمع البيروني عدداً من الأحجار والمعادن وصنفها وفحصها ووصفها وصفاً علمياً دقيقاً، ودرسها من حيث هي خامات طبيعية ومن حيث منافعها واستغلالها في الصناعة، وتناول هذا الموضوع في كتابه (الجماهر في الجواهر)، وقد سار في جميع كتبه على المنهج العلمي التجريبي وكانت التجربة العلمية الدقيقة دائماً رائده في البحث والأساس الذي يبني عليه نتائجه وأحكامه.

ومن العلماء العرب البتاني وهو محمد بن جابر (قبل 858-929م) ويُعرف عند الغربيين في العصور الوسطى باسم *Al batenius*، ولد في بتان من نواحي حرّان وتوفي في مدينة قرب الموصل وعاش معظم حياته في مدينة الرقة بسورية، وكان أعظم علماء عصره في علم الفلك الذي وقف حياته عليه، لذلك يسميه بعض مؤرخي العلوم بطليموس العرب. ويكفي البتاني فخراً أن كوبرنيق استشهد ببحوثه بعد خمسة قرون أكثر من ثلاث.وعشرين مرة في كتابه «دوران الأفلاك السماوية». وقد كشف البتاني السمت والنظير وحدد نقطتيهما من السماء كما حدد طول السنة الشمسية والفصول، وأصلح قيمتي الاعتدالين: الصيفي والشتوي، وأثبت، خلافاً لبطليموس، أن القطر الزاوي الظاهري للشمس يتغير، وبيّن احتمال حدوث الكسوف الحلقي وتوصل إلى نظرية في بيان الأحوال التي يُرى فيها القمر عند ولادته. ومن منجزاته الفلكية الشهيرة تحديد ميل فلك البروج (الدائرة الكسوفية) إذ وجد أنه يساوي *23* درجة *35* دقيقة، وقد ظهر حديثاً أن خطأه في الحساب أقل من دقيقة واحدة، وهذا يدل على أن آلات الرصد التي استعملها العرب آنذاك كانت متقنة فضلاً عن عظمة الراصدين ودقة حساباتهم.

وللبتاني كتب كثيرة أهمها زيجه المعروف باسم (زيج الصابي) وهو يحتوي على جداول توضيحية وافية تتعلق بحركات الأجرام هي من اكتشافاته وتدقيقاته. وقد كان لكتابه هذا أثر عظيم سواء في علم الفلك أو في حساب المثلثات الكروية خلال العصور الوسطى وقد تُرجم إلى اللاتينية أكثر من مرة في القرن الثاني عشر.

ومن الأعمال الجليلة التي قام بها علماء الهيئة (الفلك) العرب قياس محيط

الأرض ، فالمعلوم أن القدماء قاموا بمحاولات عدة لقياس محيط الأرض ولكنهم وصلوا إلى نتائج مختلفة متضاربة، فأراد المأمون (المتوفي 771م) حسم هذا الخلاف والوصول إلى القياس الدقيق فأنفذ جماعة من علماء الصناعة وحذاق الصناع لقياس درجة واحدة من محيط الأرض على الدائرة العظمى فوجدوا أنها تقابل نحو 56 ميلاً وهي نتيجة قريبة من قيمتها الحالية.

وقد أسهم المخترعون العرب المسلمون بكثير من الصناعات وألفوا الكتب في صناعة الأدوات والآلات، ومن أشهر الذين كتبوا في ذلك أحمد بن موسى بن شاكر (في زمن المأمون) الذي كان أعجوبة زمانه في عمل الحيل؛ فقد كان صاحب مخيلة مبدعة لا تفتأ تقدم الاختراعات العملية ذات الفوائد المنزلية ولعب الأطفال والأثقال وغيرها؛ وكانت الآلات التي صنعها أحمد تضم آلات تمتلىء بالسوائل وتفرغها تلقائياً، وقناديل ترتفع فيها الفتائل تلقائياً ويصب فيها الزيت ذاتياً، ولا يمكن للرياح إطفاؤها، ونافورات تندفع مياهها الفوّارة على أشكال مختلفة.

وفي الختام، فقد حاولنا ألا نعرض إلّا لما حققته الحضارة العربية الإسلامية من تقدم في ميدان الفيزياء والفلك في حين أن تقدم هذا الميدان مرتبط أكبر ارتباط بالرياضيات، وإذا لم يتحقق الكثير في الميدان الأول فقد تحقق في الميدان الثاني مما ينسى ذكره كثير من مؤرخي العلم الغربيين.



مقدمــة

لا بد لمؤلف قصة علمٍ ما، من أن يتقيد بالشروط والمتطلبات التي يفرضها عليه تعريف هذا العلم نفسه؛ فالعلم ليس مجرد مجموعة من المعارف بُسطت في نشرات أصيلة وجُمعت في أسفار، بل هو متابعة نشيطة لهذه المعارف يقوم بها جماعة من الأشخاص، هم العلماء، وهبوا أنفسهم لهذه المغامرة العظيمة يدفعهم إلى ذلك دافع داخلي لا يستطيعون له منعاً. ولما كانت الفيزياء، بوصفها نشاطاً فكرياً، هي البحث عن قوانين الطبيعة الأساسية، فهي لذلك العلم الأساسي الذي تُستمد منه سائر العلوم الأخرى، فليس في الكون كله ظواهر لا يُعنى بها الفيزيائي، غير أنه لا يكتفي بمجرد معرفة الوقائع، بل يمضي إلى ما وراءها، لأن هدفه الأسمى هو أن يستنبط من هذه الوقائع قوانين أساسية تمكّنه من الربط بين ظواهر تبدو كأنها لا رابط بينها وتيسر له التنبؤ بحوادث مقبلة. وثمة مثال رائع يتردد كثيراً في هذا الشأن هو وصف الفيزيائي الفلكي لتطور النجوم (كتطور الشمس مثلاً) من حالاتها الراهنة إلى مصيرها المحتوم كأقزام بيضاء أو نجوم نترونية أو ثقوب سوداء. فالفيزيائي الفلكي يؤدي هذه المهمة بتطبيق قوانين الفيزياء المعروفة على باطن النجوم لكي يكشف العمليات الديناميكية التي تتم فيها.

إن معرفة الظواهر الطبيعية، أو حتى القوانين الطبيعية وحدها، لا تؤلف علماً؛ لذلك لم نعرض قصة الفيزياء على أنها مجموعة من الوقائع فحسب بل على أنها أيضاً انبثاق قوانين الطبيعة وتطورها من الوقائع؛ فهذه القوانين لا يمكن أن تنجم إلّا عن عملية تركيب فكري متميز يجمع بين يقين الوقائع ونزوة التأمل. لذلك نؤكد مرة أخرى في هذا الصدد على أهمية التمييز بين المعرفة والعلم، إذ ما من كائن حي في هذا العالم إلا ولديه المعرفة اللازمة للحياة، حتى الخلية الواحدة، فإن معرفتها تفوق كثيراً كل ما نعيه من معارف. فأعيننا،

أو الخلايا التي تتكون منها، تعرف عن قوانين البصريات أكثر بكثير مما نعرفه. ولو كان لزاماً علينا أن نعلّم أعضاء جسمنا كيف يجب أن تعمل لعاجَلنا الموت قطعاً. ولكن مهما تكن براعة خلايا جسدنا فإنهن لسن عالمات، وكذلك فإن النحلات، كما في مثالٍ آخر، لسن عالمات حتى ولو كن يعرفن أن باستطاعتهن الاحتفاظ ببرودة خلاياهن بخفق أجنحتهن خفقاً سريعاً، وقد نقبل جدلاً أنهن تقنيات ولكنهن لسن عالمات.

فإذا سرنا مع هذه الفكرة من الخلايا والحشرات والحيوانات الدنيا إلى أنفسنا، نحن بني البشر، رأينا أن كلامنا، حتى أكثرنا جهلاً بالعلم، يعرف أشياء كثيرة عن قوانين الطبيعة بدون أن يعي ما يعرف؛ فنحن في سيرنا وركضنا وموازنة أجسامنا وتجنبنا كل أنواع المخاطر الطبيعية، نستخدم باستمرار ما نعرف، دون أن نعيه، عن قوانين الحركة وقانون الثقالة وقوانين الترموديناميك (التحريك الحراري) والمفاهيم المتجهية ومبادئ التناظر ومبادئ الانحفاظ (المصونية)، لذلك دعونا نروِ قصتنا عن الفيزياء بدءاً من اليونانيين، على ألّا يغيب عن بالنا هذا التمييز بين المعرفة بحد ذاتها وبين العلم؛ ذلك لأن الكتابة المدونة عن اليونانيين تُظهر أنهم كانوا منهمكين في تتبعهم المنهجي للمعرفة أي بداية العلم بوصفه طريقاً لفهم الكون، فكانوا بذلك، وفقاً لما بيناه من قبل، علماءً حقاً ولكنهم ليسوا علماء ناجحين.

وكتابنا، على كل حال، ليس كتاباً في تاريخ العلم، لذلك لن نتحرى كل جوانب الفيزياء اليونانية، بل سنقتصر على عرض سماتها البارزة التي تركت أثراً، سواء أكان حسناً أو سيئاً، في طريقة تفكير من أتى بعدهم من العلماء. فاكتشافات فيثاغورس وإقليدس وأرخميدس وأرسطرْخوس وهيبارْخوس وبطليموس في هذا الشأن هي أعمال مرموقة جداً. ولكن لو أردنا أن نتجاوز مجرد الوصف المختصر لأعمال هؤلاء الفلاسفة الأجلاء، حتى ولو بتفصيل يكفي لفهمها، لأدى هذا إلى توسيع هذا الكتاب توسعة يتجاوز بها ميدانه الذي يسعى إليه.

ويستطيع من لا يهتم من القرّاء بإسهام اليونانيين في الفيزياء أن يقرأ هذا الكتاب بدءاً من الفصل الثالث الذي يعالج في المقام الأول أعمال نيكولاس كوبرنيكوس وتيخوبراهه ويوهانْس كبْلر في الفلك. فقوانين حركة الكواكب السيارة التي استنتجها كبلر من بيانات الأرصاد التي قام بها براهه T.Brahe تعد من أعظم الإنجازات الفكرية التي تلت عهد

كوبرنيق ويتجلى لنا، من موازنة هذا الإنجاز بأعظم إنجازات اليونانيين القدماء، مدى الفرق الشاسع بين تأملات اليونانيين (غير المدعومة بالتجربة والرصد) والأساس المعزّز بالأرصاد الذي قامت عليه استنتاجات كبلر.

وقد أفردنا مفهوم العطالة الذي أدخله غاليليو غاليليه وقوانين الحركة التي وضعها السير إسحق نيوتن للتأكيد على أهميتها الخاصة، ذلك لأنها كانت تمثل منعطفاً كبيراً في تفكير اليونانيين والفلسفات المدرسية Scolasties فيما قبل النهضة. ويتضح هذا الانعطاف أكثر ما يتضح في تطور الفيزياء السريع الذي تم بعد نيوتن والذي أرسى في أعوام قليلة نسبياً الأسس التي قامت عليها الفيزياء التقليدية (الكلاسية Classic) والفيزياء الحديثة. فمع أن الفيزياء الحديثة انبثقت عن نظرية الكم ونظرية النسبية، إلا أنها في بعض سماتها الأساسية انطلاقة قوية من الفيزياء النيوتنية. ومهما يكن من أمر، فإن مبادئ الانحفاظ ومبادئ التناظر ومبادئ الفعل الأصغري المعروفة في الفيزياء التقليدية (النيوتنية)، والتي طوّرها في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر الفيزيائيون الرياضيون، هذه المبادئ انتقلت مع بعض التعديلات الحاسمة إلى الفيزياء الحديثة.

لذلك أكدنا في أثناء وصفنا لتطور الفيزياء التقليدية على أهمية هذه المبادئ وبيّنا أنها صلة الوصل التي تربط فئة من المفاهيم مع فئة أخرى (كالربط مثلاً بين ديناميك الجسيمات والترموديناميك)، وأنها هي التي توضح الاستمرارية في تطور الفيزياء. فهذه الاستمرارية ظلت قائمة لم يقض عليها ظهور الفيزياء الحديثة، أي نظرية الكم ونظرية النسبية؛ لذلك عُنينا بإظهار أن نظرية الكم كانت ضرورية وأنها انبثقت من الفيزياء التقليدية.

إن الانتقال من نظرية الكم إلى ميكانيك الكم (أي الميكانيك المصفوفي والميكانيك الموجي) كما طوره لوي دي بُرويْ L.De Broglie وإرْوين شرودِنْغر E.Schrodinger وفيرنَر هايزنبرغ وماكْس بورْن، قد أحدث في تفكيرنا ثورة أعظم بكثير مما أحدثه إدخال مفهوم الكم نفسه على يد ماكْس بلانْك، ذلك لأن ما جاء به هذا الانتقال (أي ما هو متوقع تماماً) كان ظاهرة تتحدى الفهم الفيزيائي. لذلك عرضنا، بقدر ما نستطيع، السمات الفيزيائية لميكانيك الكم وأشرنا في أثناء ذلك إلى السمات التي أصبحت في هذا المجال مقبولة لا جدال فيها.

ثم إنه من غير الممكن أن تكتمل قصة الفيزياء من دون دراسة، ولو موجزة، للسمات النظرية والتجريبية في الفيزياء الجسيمية الحالية. فقد تحقق في الربع الأخير من القرن الحالي تطور سريع في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة، لذلك أدخلنا دراسة هذا الموضوع في الفصل التاسع عشر.

لـويْـد مُـوتْـز

جيفِـرْسون هِين وِيفَر

الفيزياء اليونانية

«ما من أمر ذي بال إلا وسبقنا أحدهم إلى قوله دون أن يكتشفه».

ــ ألفرِد نورث هوايتِهد*

عندما نؤلف كتاباً لا يتحدث عن تاريخ الفيزياء بل يروي قصة استمرارية الأفكار والمشاهَدات والتأملات والتراكيب التي تؤلف مجموعة المعرفة التي ندعوها الآن الفيزياء، علينا أن نتجنب ذكر جوانب في هذا الموضوع تنتمي حقاً إلى تاريخ الفيزياء، لأن هذا الموضوع الأخير ليس موضوعنا هنا، وقد حاولنا انطلاقاً من هذه الفكرة، تفهُّم ما أسهم به اليونانيون في هذه القصة مع علمنا بأنه مهما تكن المساهمة التي ضمَّناها أو لم نضمنها فإن النتيجة لن تكون مرضية كل الرضى. ولئن كان من غير الممكن دمج الفيزياء اليونانية كلياً في فيزياء نيوتن، إلا أن الفلسفة اليونانية والهندسة الإقليدية ما زالتا تؤثران في تفكيرنا؛ لذلك أدخلنا في قصة الفيزياء سمات التفكير اليوناني التي نعتقد بأنها وثيقة الصلة بالفيزياء.

لم يكن قدماء اليونانيين يعرفون الفيزياء كما نعرفها ونمارسها اليوم، فلنا إذاً أن نتصور إلامَ كان سيؤول مجتمعنا اليوم لو أن أرسطو وأرخميدس اكتشفا قوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة. ولكن هذا لا يعني أن الفلاسفة والرياضيين اليونانيين لم يكونوا علماء بالمعنى الشامل للكلمة، بل كانوا بهذا المعنى علماء فعلاً، وهذا ما يتضح من أرصادهم الحاذقة للسماء ومن تأملاتهم التي لا تنتهي أبداً ومن ابتكاراتهم الرياضية. دعونا إذاً نتساءل: أين يكمن الاختلاف بين علمهم وعلم نيوتن؟ إنه يكمن بالتحديد في انعدام وجود المبادئ الفيزيائية أو القوانين التي تمكّن الإنسان من التنبؤ بأحداث قادمة من مشاهدات جارية، أو بوجه عام، تمكّنه من الربط بين عددٍ من الظواهر الكونية التي تبدو ظاهرياً متباينة.

* Alfred North Whitehead (1861-1947) فيلسوف ورياضي إنكليزي علّم الرياضيات في جامعة كمبردج ولندن، ومن أهم كتبه «السيرورة وحقيقة العالم».

ولعل بعض الأمثلة توضح هذا الاختلاف المهم وتلقي عليه مزيداً من الضوء، فما تعلمه الفلكيون اليونانيون من أرصادهم لحركة الكواكب لا أهمية له مهما عظُم، لأن ما تعلموه لا يمكن أن يساعدهم وحده على التنبؤ أو على فهم دورية المد والجزر أو سلوك الأجسام الساقطة سقوطاً حراً أو دوران نجمين متجاورَيْن (ثنائية) حول نقطة مشتركة، في حين أن قوانين نيوتن أتاحت له كما أتاحت لمن أتى بعده من العلماء تفسير حركة الكواكب والمد والجزر وظواهر أخرى والربط بينها جميعاً على أنها ظواهر ناجمة عن القوة الفيزيائية نفسها التي نسميها الثقالة. كذلك لم يستطع اليونانيون، بسبب عدم فهمهم فكرة الضغط فهماً عميقاً، أن يستخدموا مبدأ الطفو* لأرخميدس لتفسير الظواهر الجوية العامة كما فعل النيوتنيون. وهكذا فإن العلم اليوناني كان علماً اختبارياً محضاً لا يستند إلى قاعدة من القوانين أو المبادئ الأساسية.

ولكننا ما زلنا نقدِّر اليونانيين جداً لأعمالهم في الرياضيات وأرصادهم الفلكية ومستوى تأملاتهم. فعلى الرغم من أن الرياضيات ليست فرعاً من الفيزياء، فإن الهندسة، التي هي فرع مهم من الرياضيات برع اليونانيون وصاروا فيها خبراء عظاماً، وثيقة الصلة جداً بالفيزياء حتى إنه لا يمكن الاستغناء عن دراسة الهندسة اليونانية في دراسة الفيزياء دراسة صحيحة. وتأتي أهمية الهندسة للفيزياء من أن قوانين حركة الأجسام لا يمكن التعبير عنها إلا في سياقٍ هندسي. ويصح هذا أيضاً في عدد من الظواهر، منها مثلاً: الصلات الفضائية المتبادلة بين الأجسام والوصف الاختباري الحسي لحركة جسمٍ ما. فلو لم تكن لدينا هندسة لما استطعنا صياغة قوانين الفيزياء صياغة تتضح فائدتها من أنها تمكّننا من الربط بين حوادث فضائية منفصلة.

ونحن نعلم اليوم أن هناك ثلاثة أنواع من الهندسة: الهندسة الإقليدية (الفضاء المنبسط) والهندسة الزائدية (الفضاء ذو الانحناء السلبي) والهندسة الناقصية (الفضاء ذو الانحناء الإيجابي). ولكن اليونانيين لم يعرفوا سوى الهندسة الإقليدية التي لم تقتصر عملية بنائها على إسهامات إقليدس وحده بل أسهم فيها أيضاً فيثاغورس وأودُكْسوس، إذ أسسّ فيثاغورس (560 — 480 ق. م) مدرسة للفلاسفة استمرت ما يقرب من مئتي عام وتركت أثراً عظيماً في التفكير اليوناني. ومع أنه لا يُعرف عن تفاصيل حياة فيثاغورس إلّا القليل، إلّا أن الاعتقاد السائد هو أنه قضى وقتاً طويلاً من سنيه المبكرة وهو يتعلم الرياضيات في مصر وبابل؛ وبعد أن اضطر لمغادرة بيته من موطنه ساموس أقام في كروتونا بإيطالية في عام 530 ق. م حيث أسس مدرسته الفلسفية. وعلى الرغم من أنه كان

---

* يقول المبدأ بوجود قوةٍ تدفع الجسم، المغمور في سائل إلى أعلى تساوي وزنَ ما يزيحه الجسم من السائل.

لتعاليم فيثاغورس أثرها في كل مكان من جنوب إيطالية، فإن آراءه اللاديمقراطية لقيت معارضة شديدة أرغمته أخيراً على الفرار في عام 500 ق. م إلى ميتا بونتوم حيث قضى بقية سنوات عمره.

كان العدد عند الفيثاغورسيين كل شيء، فكانوا يعتقدون بأنه يمكن تفسير جميع ظواهر الطبيعة بدلالة العلاقات العددية، ولكنهم لم يضعوا أية طريقة لكشف هذه العلاقات؛ لذلك كانت فلسفتهم العددية عقيمة عديمة الفائدة؛ على أن هذا لم يمنع من أن يكون لسحر الأعداد عند الفيثاغورسيين شأن كبير يحثهم على الاكتشاف كما هو شأن جميع المبادئ الأولية الأساسية، حتى أنه دفع الفيثاغورسيين إلى البحث عن التناظرات والتوافيق في جميع الظواهر الطبيعية فقادهم بحثهم هذا إلى اكتشاف أن تناغم الأصوات الموسيقية يتعلق بمدى انتظام المجالات الفاصلة بين طبقات الأصوات المتناغمة.

وقد عمم الفيثاغورسيون هذه الأفكار إلى حد أنهم فرضوا وجود تناغم كوني فسّروا به حركات الكواكب الظاهرية التي قرنوها مع علامات موسيقية ذات طبقات مختلفة. وكان من ضمْن من تأثر بهذه النظرية التي سُمّيت «تناغم الكرات» يوهانس كبلر نفسه الذي حاول في بداية تأملاته أن يمثّل حركات مختلف الكواكب بمختلف الثمانيات (الأوكتافات) في السلم الموسيقي.

ولكن شهرة فيثاغورس تقوم اليوم على قانونه الهندسي الشهير أو بالأحرى على نظريته التي تعبر عن طول وتر المثلث القائم بدلالة ضلعيه القائمتين؛ وقد تم اليوم تعميم هذه العلاقة البسيطة التي أثبتها فيثاغورس في حالة المثلث القائم المستوي على أي عددٍ من الأبعاد وعلى الهندسة اللا إقليدية أيضاً. وهي في تعميمها هذا أصبحت أساساً لتأويل قوانين الطبيعة تأويلاً هندسياً؛ بل إن نظرية فيثاغورس في صورتها الأكثر عمومية هي بالفعل نقطة البدء في نظرية أينشتاين النسبوية العامة وكذا في جميع المحاولات الساعية إلى توحيد قوانين الطبيعة على أساسٍ من أنها تجليات لهندسة الزمكان (الزمان ــ المكان).

ثم هناك إقليدس. إنه مشهور طبعاً بفضل كتابه «المبادئ Elements» الذي يضم ثلاثة عشر جزءاً كلها تعاريف ومسلّمات (بديهيات) ونظريات، وقد جمع فيه معرفة اليونان كلها في الرياضيات، فكان تأثيره هائلاً حتى إن الهندسة الثلاثية الأبعاد ظلت مقبولة لمئات السنين على أنها الهيكل الهندسي الصحيح الذي تصاغ في ضوئه قوانين الطبيعة، بل إن الميكانيك النيوتني وكهرطيسية جيمْس كلارْك مكسويل دمجا الهندسة الإقليدية في بنيتهما النظرية. ولم يضعف شأن الهندسة الإقليدية إلا عندما بدأ كبار رياضيي القرن التاسع عشر من أمثال كارْل فريدريك غوْص ونيكولاي لوباتْشوفسْكي وجورج ريمان، بالتصدي لمسلمة إقليدس الخامسة التي تنص على أنه إذا أُعطينا مستقيماً ونقطة خارجه فإن هناك مستقيماً واحداً يمر بهذه النقطة ويكون موازياً للمستقيم المعطى. وقد أدى نفي هذه البديهية إلى الهندسة اللا إقليدية الحديثة التي استُنبط منها عدد من

النظريات الحديثة جداً .

وربما كان خير معبِّر عن الفرق الشاسع بين الفيزياء الحديثة والفيزياء اليونانية هو ذلك الفرق بين نظريتنا الذرّية الحالية والمذهب الذري اليوناني الذي قام به ديموقريطس وأتباعه من الفلاسفة ، إذ افترض هذا فرضية جذابة جداً مفادها أن المادة كلها تتألف من جسيمات غير قابلة للتجزئة (ذرات) تتفاوت بطرائق عديدة (بالحجم مثلاً أو بالكتلة أو باللون) ، وتتحد هذه الجسيمات بعضاً مع بعض لتكوِّن جميع المواد التي نراها في الكون . بيد أن الذريين اليونانيين لم يقدموا أي وصف أو صيغ رياضية تساعد على تقدير أي خاصة من خواص المادة تتنبأ بأي ظاهرة من الظواهر ، لذلك ظلت نظريتهم الذرية عقيمة عديمة الفائدة .

هذا من جهة . ومن جهة أخرى ، فإن الفيزياء الذرية الحديثة اعتمدت في بنائها على التفاعلات الكهرطيسية المتبادلة فيما بين الذرات المشحونة بالكهرباء ، فهي لذلك ميدان معرفة محدد الصياغة نشأ عن تركيبٍ جمع بين الرياضيات ومبادئ فيزيائية أساسية ؛ لذلك يستطيع الفيزيائيون أن يقدِّروا في ضوئه الظواهر الذرية والجزيئية بدقة لا تصدَّق . ومع أن اليونانيين عرفوا شيئاً عن الكهرباء والمغنطيسية إلا أنهم لم يربطوا الظواهر الكهربائية والمغنطيسية أبداً بذرات ديموقريطس .

ومن بين جميع الفلاسفة اليونانيين الذي عُنوا بالظواهر الفيزيائية ، كان أرخميدس أجدرهم بالتقدير وأكثرهم اتصافاً بما يعدّ اليوم من صفات العالم . لقد ولد أرخميدس (287-212 ق . م) ابن الفلكي فيدْياس في سرقسطة ، وكان صديقاً حميماً للملك هيرون حاكم سرقسطة المحلي ، وقد أمضى شطراً من شبابه في مصر يتعلم الرياضيات من تابعي إقليدس المباشرين ثم عاد بعد ذلك إلى سرقسطة حيث قضى كل ما بقي له من حياته .

لقد وَفّق أرخميدس بين النظرية والتجربة بطريقة تشبه الأسلوب العلمي الراهن ، ولكن دون أن يستنتج من عمله قاعدة أساسية من المبادئ العلمية ، وحاول أن ينجز في العلم ما سبق أن أنجزه إقليدس في الهندسة ، فحاول أن يبين أنه يمكن أن تُستنتج المعرفة العلمية على صورة نظريات بدءاً من مجموعة من القضايا الواضحة بحد ذاتها ؛ ولكننا لا نعرف سوى القليل عن بديهيات أرخميدس أو عن النظريات التي استنتجها منها .

غير أن الشيء الأكيد هو أن أرخميدس كان مجرباً عظيماً ومخترعاً وتلميذاً حاذقاً للطبيعة ، وهذا ما تشير إليه اكتشافاته ومؤلفاته الرياضية . ولما لم يكن لديه مختبر جيد الإعداد والتجهيزات لتجرى فيه تجارب راهنة ، كان عليه أن يُجري ذلك النوع من التجارب الفكرية التي يتميز بها جميع العلماء العظام. ولكن أكثر ما اشتهر به هو اكتشافه مبدأ « الطفو » المسمى باسمه ، كما أنه عرف على

الأرجح قانون انعكاس الضوء عن المرايا في الهواء. وتتدرج اختراعاته من (الشادوف)* إلى نموذجٍ من (البلانيتاريوم)**بالإضافة إلى الشعيْرات المتصالبة (المحكَمة) التي يزوَّد بها المنظار والتي استعان بها لإجراء أرصاد سماوية دقيقة. وبرهن أرخميدس على مهارته الرياضية بأن بيَّن كيف تُستنتج قيمة π (بي) هندسياً (أي نسبة محيط الدائرة إلى قطرها) بأي دقة يرغب فيها. وقد فعل ذلك بأن قارب محيط الدائرة إلى محيط مضلع منتظم مرسوم فيها أو عليها ثم زاد عدد أضلاع هذا المضلع زيادة مستمرة وساوى بين محيط هذا المضلع ومحيط الدائرة فحصل على سلسلة لا نهاية لها للعدد π.

كما كتب أرخميدس كتاب «عداد الرمل» لكي يبرهن على أن الأعداد المنتهية مهما كانت كبيرة فإنها في الحقيقة تختلف عن اللانهاية، وهذا ما يتضح من العبارات الأولى في كتابه «كان هناك ملك يدعى جيلون يظن أن حبات الرمل لا نهاية لعددها، وما أعنيه بالرمل ليس فحسب ذاك الموجود في سرقسطة وفي سائر صقلية بل ذاك الذي يوجد أيضاً في كل مكان سواء أكان مسكوناً أو غير مسكون، ومن ناحية ثانية، يعتقد بعضهم، ويقبلون أن عدد حبات الرمل منتهٍ، مع أنه لم يوضع أيّ اسم لعددٍ هو من الكبر بقدر يكفي ليتعدى عدد الحبات». وقد حسب أرخميدس عدد حبات الرمل اللازمة لكي تصبح بحجم بزور الخشخاش، ثم حسب عدد بزور الخشخاش اللازمة لتصبح بقطر الإصبع واستمر على هذا النحو حتى وصل إلى ما يقارب 10000 ستاديوم (كل ستاديوم يعادل 607 أقدام)***، وهكذا توصل إلى عدد حبات الرمل التي كان يعتقد بأنها ضرورية لملء الكون كله، ولكن الأهم من معالجته هذه الأعداد الضخمة ببساطة ويسر هو تصنيفه إياها في مراتب وأدوار.

وقد توفي أرخميدس وهو في الخامسة والسبعين عندما استسلمت سرقسطة أخيراً لروما بعد حصارٍ قاسٍ أطالت أمده ابتكارات أرخميدس الدفاعية الفذة. وقد ورد في كتاب هـ. و. تورنْبل H.O.Turnbull «كبار الرياضيين»[1] أن القائد الروماني مارْسيلوس أمر بأن يؤسَر أرخميدس حياً، لأنه «يجعل من مراكبنا أوعية يغرف بها من ماء البحر، ويصيب بسهامه العاصفة سفننا بمذلة ومهانة، ويتفوق على مردة الأساطير ذوي مئات الأيدي في إطلاق الكثير من قذائفه يصبها علينا دفعة واحدة!». وعلى الرغم من أن جهود أرخميدس في دفاعه عن مدينته كانت فذة خارقة، فإنه لم يكن يرى فيها إلا تطبيقات للميكانيك، وهو موضوع ثانوي الأهمية إذا قورن بمحبوبته الهندسة. وكان ولع أرخميدس بموضوعه الأثير من الشدة بحيث عندما سقطت المدينة، وتدفقت الفرق الرومانية

---

* ويسمى حلزون أرخميدس وفيه يسحب الماء من النهر بتدوير الشادوف باليد أو بآلة.

** نموذج يبين حركة الشمس والكواكب والقمر والأجرام السماوية الأخرى بإسقاط صورة فوتوغرافية للسماء على قبة كروية من الداخل.

*** القدم يساوي 30,48 سنتمتراً.

عبْرَ البوابات المحطمة ظل مستغرقاً في تأمل مخطط رياضي مرسومٍ على الرمل فقتله أحد الجنود الرومانيين. ومع أن الرومان بحسب رأي أ. ن. هوايْتهِدْ A.N.Whitehead «كانوا من سلالة عظيمة» إلا أنهم ابْتلوا بالعقم إذ انصرفوا عن التأمل واهتموا بشؤون الحياة، لذلك رأى هوايْتهِدْ أن موت أرخميدس كان حدثاً بارزاً، وفي رأيه أن «الرومان لم يكونوا على قدر كافٍ من التأمل الذي يوصلهم إلى وجهات نظر جديدة قد تمكّنهم من زيادة سيطرتهم على قوى الطبيعة» أو باختصار «ما من روماني فقد حياته لأنه كان مستغرقاً في تأمل مخطط رياضي».

لنتحدث أخيراً عن أرسطو (384-322 ق. م) أشهر تلاميذ أفلاطون والذي سبق أرخميدس بما يقرب من مئة عام. لقد ولد أرسطو في ستاغيرا Stagira في خلكيدية Chaleidiee وهيمنت فلسفته على تفكير الإنسان مدة تقرب من ألفي عام وشملت مجالات عديدة منها الفيزياء والأرصاد الجوية وعلم الحياة وعلم النفس. وكان والده طبيب القصر في مقدونية فأسهم على الأرجح في تعلق أرسطو المبكر بعلم الحياة وبتصنيف العلوم. وقد التحق أرسطو بعد تيتمه المبكر بأكاديمية أفلاطون في عام 367 ق. م، فأمضى فيها السنوات العشرين التالية وهو يدرس على أستاذه الذي «تعرَّف عظمة هذا التلميذ القادم من الشمال الذي يزعمون أنه متخلّف»، وقد تحدث عنه مرة على أنه عقل Nous الأكاديمية ــ أو كما يقال: «الذكاء المتجسد»[2]. وبعد موت أستاذه عام 347 ق. م، أمضى أرسطو عدة سنوات وهو يتجول بين عددٍ من الممالك اليونانية المجاورة قبل أن يعود إلى مقدونية ليكون معلماً خاصاً للأمير الفتى الذي عُرف يوماً باسم الاسكندر الأكبر، ثم أسس بعد عودته إلى أثينا مدرسة اللوقيين Lyceum التي اجتذبت إليها العديد من التلاميذ، وأولت عنايتها إلى علم الحياة والعلوم الطبيعية خلافاً لأكاديمية أفلاطون التي انصرفت للرياضيات والفلسفة السياسية والأخلاقية[3]. وقد كان أرسطو يعتقد بأن الملاحظة هي أساس دراسة العلم مما دفعه إلى جمع المواد اللازمة لإقامة «متحف تاريخ طبيعي ومكتبة للخرائط والمخطوطات (بما فيها مقالاته الخاصة وأمالي محاضراته)، ونظَّم برنامجاً للبحث مهد السبيل لتأسيس تواريخ الفلسفة اليونانية الطبيعية كلها بما فيها الرياضيات والفلك والطب»[4] «وإذا صدق قول بليني Pliny، فإن الاسكندر عمّم على صياديه وحراس أملاكه وبستانييه وصيادي السمك بأن يزودوا أرسطو بكل ما يرغب به من حيوان أو نبات، كما يخبرنا كُتّاب آخرون أنه كان تحت تصرفه في إحدى المرات ألف رجل انتشروا عبْر اليونان وآسيا ليجمعوا له نماذج من حيوانات كل أرض ونباتاتها»[5].

وكانت الرياضيات في نظر أرسطو المفتاحَ الذي يقدم لنا نموذجاً يُحتذى لتنظيم العلم، وهذا شعور ربما تكوّن لديه حين كان في أكاديمية أفلاطون حيث كانت تدرس جدياً الرياضيات والمناقشات الجدلية الموجهة نحو اختبار الفروض التي وضعها العقل. وكان أرسطو يرى أن بنية العلم هي نظام بديهي تُستنتج فيه النظريات استنتاجاً سليماً من المبادئ الأساسية التي بعضها خاص بالعلم (الفرضيات والتعاريف وهذه التعاريف على غرار تعاريف إقليدس)، أما المبادئ الأخرى فلها

تطبيقات في أكثر من نظام واحد (البديهيات التي على غرار الأفكار الأولية الشائعة التي تحدث عنها إقليدس). ومن جهة أخرى فإن محاولته في أن يستخدم الرياضيات أداة للتعميم اضطرته إلى أن يسند إلى الجدل المفضل لدى أفلاطون دوراً داعماً يستعان به حينئذ في حال إخفاق الرياضيات في تحرير العلم من ترديه ودورانه في دائرة مفرغة[6].

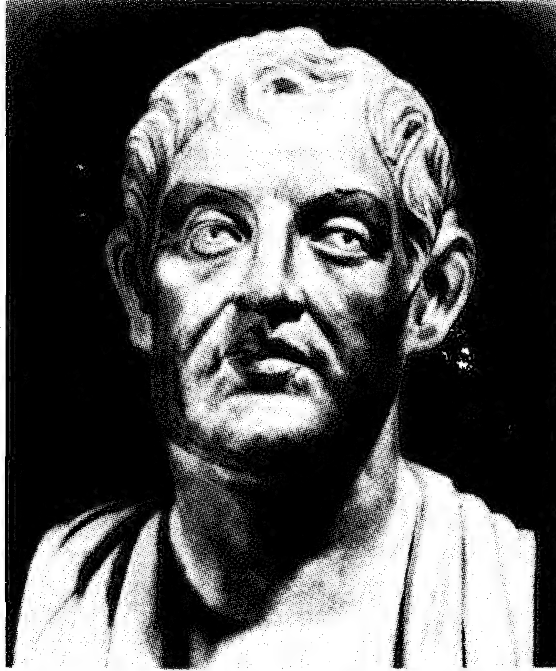
ومع أن أرسطو نال ما يستحق من الثناء على نظام التصنيف الذي وضعه والذي ترك أثراً عميقاً في تطور علم الحياة (البيولوجية)، إلا أن مساهمته في الفيزياء كانت عديمة الأثر؛ فقد كان كتابه في الفيزياء نوعاً من الخليط الميتافيزيائي المشوش الذي يوحي بالتعلق بما يدعى «الموضوعات الأساسية» التي تتدرج من اللانهاية والزمان إلى الحركة والمكان. غير أن هذا الكتاب كان مدونة تاريخية قيمة لأن أرسطو عدد فيه وجهات نظر الفلاسفة الأوائل الذين سبقوا سقراط، ولكنه لم يقصد التنبيه إلى مساهمات أسلافه بقدر ما كان يهدف إلى دحض آرائهم وتسفيهها. وإذا كان كتابه الفيزياء لم يقدم سوى القليل في مجال المعرفة الفلكية ورفض على نحو بيّن الاعتقاد الفيثاغوري بأن الشمس مركز الكون، فإن تأملاته في الأحوال الجوية عن عملية التبدل المستمر في العالم كانت ملهمةً فعلاً. «فالشمس تبخر ماء البحر باستمرار وتجفف الأنهار والجداول وتحوِّل المحيطات الشاسعة في نهاية الأمر إلى صخور جرداء، في حين تتجمع الرطوبة المتصاعدة على شكل غيوم فتحيي بسقوطها الأنهار والبحار»[7]. غير أن أرسطو كان عاجزاً عن تنسيق مشاهداته وتركيبها أو أن يظهر هيكل البنية التحتية في الطبيعة لكي يصوغ في النهاية نظرية مفيدة عن العالم الفيزيائي.

ولقد حاول أرسطو تطوير نظرية عن الحركة هدفها تفسير السلوك الحركي لجميع الأشياء المشاهدة ابتداءً من النجوم وانتهاءً بالأجسام الأرضية، ولكنه ضل في تحليل حركات الأجسام لاعتقاده بأن الجسم لا يمكن أن يظل محافظاً على حركته إلا إذا بقي على تماس مباشر مع «محركٍ فاعلٍ باستمرار». أما إذا لم يحافظ المحرك على تماسه مع الجسم فإن هذا الجسم يتوقف فوراً عن الحركة. فأرسطو لم يكن لديه إذاً أي فكرة عن مفهوم العطالة، وهكذا أخفق في اكتشاف قوانين الحركة.

وقد وضع أرسطو مذهبه في العلل ليفسر به لماذا تحدث الظواهر، فاختصر العلل كلها إلى أربع أساسية صنفها بالأسماء: «مادية»، «صوتية»، «فعالة»، «نهائية». وقد أوردنا هذا التصنيف لإظهار مدى ابتعاد تفكير أرسطو عن مفهوم السببية الحديث. أما أن أرسطو كان ملاحظاً ماهراً فهذا ما يتضح من اكتشافاته الجيولوجية ومن خطط تصانيفه الحيوية، فقد ظلت مساهماته هذه حتى الآن صالحة جديرة بالاهتمام.

ولكن مضمون الفيزياء اليونانية بمجموعها ليس بذي شأن، وأهم ما فيها يكمن في أنها تُظهر كيف أن العلم الدقيق المفترَض يكون غير مجدٍ إذا لم يقم على أساس نظري مكين مدعوم برياضيات

قوية. لقد اكتشف اليونانيون فعلاً بعض الحقائق الهامة عن الطبيعة إلا أن علمهم لم يتقدم لأنهم كانوا يفتقرون إلى مبادئ تنير لهم سبيل بناء علم بفضل بذور نموه؛ ونحن، مع ذلك، نؤمن بأننا نستطيع أن نتعلم من اليونانيين شيئاً مهماً هو أن الفيزياء الحديثة تصبح في خطر إذا تطورت في حقل من النظريات خالٍ من الوقائع. ومع أنه لم يكن لدى اليونانيين شكلية رياضية كافية لتطوير قاعدة نظرية متينة لفيزيائهم، إلا أنهم كانوا أذكياء وعباقرة في تأملاتهم. ويسود اليوم ما يماثل ذلك في أكثر مراحل الفيزياء تقدماً؛ ففيزياء الجسيمات الأولية غارقة في بحر من الشكلية؛ ففي كل يوم تظهر في أشهر المجلات الفيزيائية نشرة تلو نشرة تكون كلها مليئة بخليط مبهم من المعادلات الرياضية من دون أي استنتاجات عددية. وما غياب الأعداد في نهاية هذه النشرات إلا ظاهرة واضحة على اعتلال صحة الفيزياء النظرية في هذه الأيام لأنها تظهر لنا بأن الفيزيائيين النظريين يدرسون عالماً وهمياً لا عالماً حقيقياً.



أرسطو (384-322 ق.م)

الفلك اليوناني

«لا شيء يتحرك في هذا العالم إلا وله منشأ يوناني ما عدا قوى الطبيعة العمياء».
ـ السير هنري جيمس سمَّرمين*

لسنا بحاجة للاعتذار عن إدخال الفلك اليوناني في قصتنا عن الفيزياء، لأن الفلك أصبح اليوم أكثر من أي وقت مضى فرعاً من الفيزياء؛ ويكفينا لتأكيد ذلك أن نلاحظ العلاقات القائمة بين فيزياء الطاقة العالية والكونيات (كوسمولوجية) أو بين تطور النجوم والفيزياء النووية، أو تلك العلاقات بين بنية المجرات وتحريك السوائل؛ فهي تُظهر مدى الرابطة المتينة بين فرعيْ المعرفة هذين؛ بل إن قصة الفيزياء تبدأ من بعض نواحيها بالفلك اليوناني، إذ كان اليونانيون أول من حاول فهم حركات النجوم والكواكب في سماء الليل وتفسيرها؛ فالفكرة القائلة بأن الأجرام السماوية تخضع لقوى غير مرئية (نعبر عنها اليوم بقوانين فيزيائية) بدأت على الأرجح، ولو بشكل غامض، عند الفلكيين اليونانيين؛ فمع أن معتقداتهم تبدو لنا اليوم عتيقة إلا أنهم حاولوا استخدام رياضياتهم ليفهموا ما كانوا يتخيلون أنه بنية الكون «الهندسية»، وتحبيذهم للعمل الرياضي الفكري البحت (في مقابل تطبيقاته العملية) لم يمنع عدداً من الفلكيين اليونانيين من أن يُظهروا فائدة التقنيات الرياضية، فقد أقدموا على حساب بعض الأشياء مثل قطر الأرض وعدد حبات الرمل في الكون المعروف حينئذ. وقد كانت هذه الوقائع توحي بأن الرياضيات يمكن أن تكون عوناً للفلكيين تزوّدهم بوسائل التعبير كمياً عن ظواهر فيزيائية منفصلة. على أن فكرة استخدام الرياضيات لتكون لغة مشتركة للعلوم لم تكن موضع اهتمام جدي عند اليونانيين، فما استطاعوا بالتالي أن يذهبوا إلى أبعد من الانشغال بأعمال الرصد الفلكي العقيمة نسبياً ليصوغوا قوانين فيزيائية تفيدهم في تفسير أرصادهم.

* Sir Henry James Summer Maine.

ولكن، على الرغم من أن اليونانيين لم يطوّروا إطاراً من القوانين الفلكية أو المبادئ الأساسية تكون لهم هادياً في دراستهم الفلكية، فإنهم جمعوا مقداراً ضخماً من جداول الأرصاد، وقدموا نماذج متنوعة للكون كان لها تأثير عظيم في فلك ما بعد اليونانيين، وساهموا في الفلك أكثر مما ساهموا في الفيزياء، ويعود ذلك، في المقام الأول، إلى أن تأمل السماء في الليل أسهل بكثير، بل وأكثر متعة، من تحليل محتوى المادة وبنيتها؛ فجمال السماء الرائع وغموضها يشدان المرء إلى الدراسة والتساؤل والعجب، وجاذبيتها لليونانيين المغرقين في نزعتهم إلى الفلسفة لا يمكن أن تقاوم، لذلك وعلى قدر ما ازدهرت الدراسة الفلكية ضعفت الدراسة الفيزيائية.

ومع أن فيثاغورس وأتباعه وضعوا الأرض في مركز الكون إلا أنهم تصوروا أنها على شكل كرة تتحرك على محيط دائرة صغيرة مرة كل 24 ساعة. وهكذا فسّروا دوران السماء الظاهري اليومي مع نجومها بالإضافة إلى حركة الشمس والقمر اليومية؛ ولم يخطر في بالهم أبداً أن الأرض تدور حول محورها الخاص. وكان الفيثاغورسيون يعتقدون بأنه لا بد أن يكون في مركز مدار الأرض نار مركزية تنير الشمس والقمر، ولما كان هذا النموذج البدائي غير قادر على تفسير جميع المشاهدات، عمد الفيثاغورسيون إلى تجميل نموذجهم بمزايا أخرى لا تستند إلى أي أساس فيزيائي.

وعلى الرغم من الرأي السائد بأن الأرض ساكنة والسماء تدور حولها، فإن عدداً قليلاً من الأفراد لم يكونوا مقتنعين بصحة هذه النظرية القائلة بمركزية الأرض في الكون. فأرسطَرْخوس الساموزي (310-230 ق. م) كان، كما نظن، أول من قدم نظرية تقول بمركزية الشمس في الكون. وقد ولد أرسطَرْخوس هذا في جزيرة ساموز (في الأرخبيل اليوناني) وأدرك مدرسة «اللوقيون» التي أسّسها أرسطو في الأصل، فدرس فيها على يد استراتو Strato الذي لُقِّب «بفيلسوف الفيزياء». وكان أرسطرخوس يفضل الرياضيات حتى أنه عُرِف فعلاً بين المعاصرين «بالرياضي»؛ ولعل هذا اللقب أطلق عليه لتمييزه من أشخاص آخرين كان لهم اسمه[1].

كان أرسطرخوس صاحب الفضل الأكبر في نشوء تصورنا الحديث لمركزية الشمس في المنظومة الشمسية، ولم يبق لنا من مؤلفاته سوى كتاب عن حجم الشمس والقمر وأبعادهما. ويتضح من هذا الكتاب أن أرسطرخوس أوَّل من قام بمحاولة جدية لقياس بعديْ الشمس والقمر عن الأرض. ولا شك أن ملاحظات كهذه هي التي قادته في النهاية إلى نموذج مركزية الشمس في المنظومة الشمسية. وقد كان لهذا النموذج تأثير كبير لدى كوبرنيق الذي نستطيع التحدث عنه على أنه أرسطرخوس الحديث. لقد فكر أرسطرخوس أن القمر حين يكون في الربُع (التربيع) الأول، أي حين يكون نصف قرصه المرئي مضاءً، فإن المستقيم الواصل من مركز الأرض إلى مركز القمر يكون متعامداً مع المستقيم الواصل من مركز القمر إلى مركز الشمس. فلو كانت المسافة، في ذلك الحين، بين القمر والشمس تساوي تقريباً بعد القمر عن الأرض لكانت زاوية الخط الواصل من

الأرض إلى الشمس مع الخط الواصل من الأرض إلى القمر °45 درجة في حين نجد أن هذه الزاوية تقرب من °90 درجة ، مما يعني أن بعد الشمس عن القمر ، وبالتالي بعدها عن الأرض أكبر بمرات كثيرة من بعد القمر عن الأرض . ولكن القمر والشمس يبدوان كأنهما بحجم واحد ، مما يدل على أن الشمس، في الحقيقة أكبر بكثير من القمر ومن الأرض ، وهكذا استدل أرسطرْخوس من هذا بأن ما هو معقول أكثر هو أن يدور جسم أصغر كالأرض حول جسم أكبر منه كالشمس لا أن يحدث العكس .

وقد ذكر المهندس المعماري فِتْروفيوس Vitruvius أن أرسطرخوس لم يكن يملك مواهب رياضية خارقة فحسب بل كان يملك أيضاً مقدرة على استخدام مواهبه في حل مسائل عملية . وكان فتروفيوس يعتقد بأن أرسطرخوس هو الذي اخترع السكيف Skaphe وهو مزولة « تتألف من نصف كرة وإبرة تنتصب عمودياً في الوسط لتلقي بظلالها »[1] . ومع أنه من غير الواضح ما الذي جعل رياضياً متميّزاً مثل أرسطرخوس يشغل نفسه بأوضاع الأجرام النسبية في المنظومة الشمسية ، إلا أن من المحتمل أنه حين كان يُعد كتابه « مكّنه ذلك من تقدير حجميْ الأرض والشمس النسبيين وقاده إلى اقتراح نظام مركزية الشمس »[1] .

وعلى الرغم من الاستحسان الذي لاقاه تفكير أرسطرخوس الجريء عند بعض قدماء النقاد والمعلقين ، فإن نموذج مركزية الشمس لم يلق قبولاً واسعاً ؛ فأرخميدس ، على سبيل المثال ، جادل بأن نموذج مركزية الشمس الذي اقترحه أرسطرخوس كان فيه خلل من الناحية الرياضية إذ يبدو من اقتراحه « أن نسبة الأرض إلى الكون ، كما كان يُعتقد عموماً ، تساوي نسبة الكرة التي تدور وفقها الأرض بحسب اقتراح أرسطرخوس إلى كرة النجوم الثابتة »[2] . على أن انتقاد أرخميدس لم يكن دقيقاً لأنه افترض أن أرسطرخوس كان يعبر عن حقيقة رياضية في حين أن كل ما كان يريده في حقيقة الأمر هو أن يظهر صغر الأرض بالنسبة إلى ضخامة الكون الهائلة . ومما زاد في سوء الطالع الذي لحق بنظرية أرسطرخوس واستمرارها ، تعلقها بتأملات خرافية عن الكون مما دل على أنها متدنية الأهمية إذ إن الرياضيين اليونانيين الأكثر موهبة كانوا يوجهون عنايتها للفلك ؛ فبراهين أبولونيوس البيري (من بيرا Pera) وهبّارخوس وبطليموس وحساباتهم الدقيقة كانت تستند إلى تكييف هندسي، ثم إن هذه النظريات الكونية مع ما أتت به من دوائر التدوير (الإبيسكلات) أو دوائر الاختلاف المركزي eceentrics ، كانت أعقد رياضياً من مركزية الشمس الأقدم منها ، لذلك بدت هذه الأمور ذات صلاحية فكرية أقوى واجتذبت بالتالي اهتمام الفلكيين والرياضيين اليونانيين .

أما هيراقليدس الذي عاش في القرن الرابع ق . م ، أي سبق أرسطرخوس بما يقرب من قرن ، فقد اقترح أن الأرض تتحرك ولكن « ليس بطريقة متقدمة بل بطريقة دورانية حول مركزها الخاص من الغرب إلى الشرق مثل دوران دولاب ذي محور » ، فكانت هذه الفكرة ، أي فكرة أرض تدور ، انحرافاً

جريئاً عن تعاليم أفلاطون وأرسطو اللذين درس هيراقليدس معهما، فهما يقولان «إن السماء تدور حول أرض ثابتة». وربما كان هيراقليدس فيثاغورسياً أيضاً، إذ يقال إنه شهد المدارس الفيثاغورسية، كما ذُكر عنه في كتابات فلاسفة آخرين من ذلك العهد أنه قال بأن الزهرة Venus لا تدور حول الأرض بل حول الشمس لأن بعدها عن الأرض كما يُستدل من تبدل بريقها الظاهري يتغير تغيراً ملحوظاً.

ثم مرت بعد أرسطرخوس بضع مئات من السنين قبل أن تبذل محاولة جدية لبناء نموذج فيزيائي للمنظومة الشمسية يتضح منه على نحو صحيح كيف تتم حركة الشمس والقمر والكواكب التي عُرفت حركاتها الظاهرية. وكان الفلك الرصدي ما يزال مزدهراً ولا سيما في الاسكندرية حيث قامت جماعة من الراصدين، بدعمٍ من أسرة البطالمة الحاكمة وتشجيعهم، بتعيين مواضع الكواكب والنجوم تعييناً دقيقاً مستعينة لذلك بأدوات مدرَّجة. وقد دفعهم اهتمامهم بتنظيم التقويم إلى متابعة حركات الشمس والقمر الظاهرية؛ فكانت أرصادهم بعد ذلك عوناً لهبّارخوس وبطليموس لكي يطوّرا نظريتهما عن دوائر التدوير التي فسّرا بها حركات الكواكب الظاهرية في نموذج المنظومة الشمسية القائل بمركزية الأرض.

وفي أثناء ذلك لم يكن الفلك النظري مهملاً تماماً؛ فأبولونيوس البرجي (من برج Perge) (262-200 ق. م) الذي كان أحد كبار الرياضيين الأوائل، والذي قضى معظم حياته في الاسكندرية، طوّر هندسة حركات الكواكب الظاهرية التقهقرية التي أدخلها بطليموس بعدئذ بأسرها في نظريته عن مركزية الأرض؛ كما كان لنظريته في القطوع المخروطية تأثيرها ــ بعدما يقرب من 1300 عام ــ في يوهانس كبلر الذي رأى أن مدارات الكواكب حول الشمس هي مخروطية ناقصة. وقد أصبح أبولونيوس معروفاً بصفته «أعظم رياضي» نظراً لكتاباته الواسعة في الرياضيات والتي كانت تمتاز امتيازاً بارزاً بوضوحها وبعدها عن التعابير التقنية؛ كما توصل إلى خواص القطوع باستخدام أسلوب هندسي بحت، وبيَّن كيفية إيجاد أقصر مسافة بين نقطة مفروضة وقطْع وأطول مسافة بينهما. وتبعاً لما جاء في كتاب هـ. و. تورنْبل «كبار الرياضيين» كان أبولونيوس يعرف «كيفية العمل بما يفترض أنه معادلة من الدرجة السادسة في س و ع أو تكافؤها الهندسي ــ وهذا عمل يعدّ فذاً في زمانه».

ويُعتقد أيضاً بأن أبولونيوس قد ابتكر طريقة سريعة لحساب المقدار π (بي) تقريبياً في كتابه «الأعداد الصماء الفوضوية»؛ وهذه الطريقة هي، كما يعتقد تورنْبل، عمل يمكن أن يفهم على أنه كان نظرية بدائية للتقارب المنتظم.

وقد دفع التوسع التجاري وانتشار الاكتشافات الأرضية على نطاق واسع في ذلك العصر، إلى الاستمرار في زيادة دقة الملاحة البحرية وفي معرفة هندسة الأرض مما أثار نشاطاً جغرافياً عظيم الشأن. وكانت كروية الأرض أمراً معروفاً عند الفيثاغورسيين أو أنهم أدركوه بحدسهم، كما أن أرسطو

قدَّر محيط الأرض بما يقرب من 40000 ميل*. وقد كان واضحاً تماماً لدى الملّاحين القدامى أن الأرض كروية لأنهم لاحظوا كيف تتغير أوضاع النجوم بالنسبة إلى الأفق عندما يبحرون شمالاً أو جنوباً ؛ فهنالك كوكبات (مجموعات نجمية) لم تظهر أبداً عندما أبحر الملّاحون شمالاً ولكنهم رأوها تشرق وتغيب عندما أبحروا جنوباً.

وهكذا لم يبق على الهندسي العظيم إيراتوستين الاسكندراني (276-194 ق . م) سوى أن يقوم بتعيين مقدار محيط الأرض تعييناً دقيقاً، وكان حينذاك قيِّماً على متحف الاسكندرية العظيم. ولا تختلف طريقة إيراتوستين عن الطريقة الجيوديزية الحديثة، وهي تعيين طول قوسٍ على سطح الأرض تقابل درجة واحدة (أي ما يقال عنه باختصار طول الدرجة). ويعرَّف «طول الدرجة» على سطح الأرض بأنه المسافة التي يجب أن يمشيها شخص على طول دائرة عظمى (أو على محيط الأرض في أحد أوضاعه) لكي يتغير منحى خيط المطمار (أي منحى الشاقول) درجة واحدة. وتساوي هذه المسافة تقريباً 69 ميلاً، وهكذا فإن محيط الأرض (أو طول دائرة عظمى بكاملها) يساوي تقريباً 69x°360 أي نحو 24840 ميلاً.

غير أن إيراتوستين لم يقس طول الدرجة بل لاحظ أن الشمس في أسوان عند ظهيرة أطول يوم في السنة، تكون فوق الرأس مباشرة (لأنها لا تُلقي بأي ظلٍ على قعر بئر عميقة)، ولكن إبرة المزولة (أي عصا شاقولية) تُلقي في الاسكندرية في هذا الوقت نفسه بظلٍ يدل على أن الشمس كانت هناك جنوب أو (تحت) السمت بمقدار $7\frac{1°}{4}$، ولكن المسافة على طول دائرة عظمى بين أسوان والاسكندرية تساوي تقريباً 500 ميل، والزاوية $7\frac{1°}{4}$ درجة تعادل تقريباً $\frac{1}{50}$ من الدورة الكاملة °360، وهكذا وجد إيراتوستين أن طوّل محيط الأرض يقرب من 25000 ميل (أو بدقة أكثر 24500 ميل)، وهي قيمة قريبة من القيمة الحديثة قرباً شديداً.

ولا شك في أن هبّارخوس (190؟-120 ق . م) كان أعظم الفلكيين اليونانيين الأوائل، فقد مهدت أعماله الرصدية والنظرية لعمل بطليموس الذي كان كتابه المجسطى **Almagest** مرجع الفلكيين لمدة 1500 عام تالية، ولم يبق لنا من كتب هبّارخوس العديدة سوى كتاب واحد كُتب في عام 140 ق . م وهو يورد فيه اكتشافه المبكر لمبادرة الاعتدالين بالإضافة إلى فهرس للنجوم. وطبقاً لما أورده بطليموس في كتابه المجسطى الذي يصف فيه أعمال هبارخوس بأكملها، فإن هبارخوس بدأ أرصاده في عام 161 ق . م، وكان قد درس أعمال البابليين الفلكية وكذلك أعمال الاسكندرانيين الأوائل، وهذا ما قاده إلى اكتشافه الشهير، أي مبادرة الاعتدالين نحو الغرب.

---

* الميل يساوي 1610 أمتار.

وقبل أن نشرح هذا الاكتشاف علينا أن نعرّف ما هو المقصود بالاعتدالين ؛ فالفلكيون يستخدمون دائرتين تخيليتين سماويتين عظيمتين مرسومتين على القبة السماوية ويستعينون بهما في وصف شروق النجوم وغروبها والحركات الظاهرية للشمس والقمر والكواكب : والدائرة الأولى هي دائرة الاستواء السماوية (وهي الدائرة العظيمة التي تتعين من تقاطع مستوي دائرة استواء الأرض مع القبة السماوية) ؛ أما الدائرة الثانية فهي دائرة البروج (أو دائرة الكسوف ، وهي الدائرة التخيلية التي يبدو كأن الشمس تسير عليها في اتجاه الشرق متنقلة بين البروج من يومٍ إلى يوم خلال سنة كاملة) . ونظراً لأن مستوى إحدى هاتين الدائرتين العظيمتين يميل على مستوي الأخرى بما يقرب من $23\frac{1}{2}°$ درجة ، فإن دائرة الاستواء السماوية تتقاطع مع دائرة البروج في نقطتين على القبة السماوية متقابلتين قطرياً ، تدعى إحداهما « الاعتدال الربيعي » والأخرى « الاعتدال الخريفي » . ولما كانت الشمس تتحرك في تنقلها الظاهري نحو الشرق وفق دائرة البروج فهي تمر بهذين الاعتدالين مرة في كل عام ــ مرة في 21 آذار تقريباً في الاعتدال الربيعي ، ومرة في 21 إيلول تقريباً في الاعتدال الخريفي . والسبب في تسمية هاتين النقطتين بالاعتدالين هو أن الشمس تشرق في هذين اليومين عند الساعة 6 قبل الظهر من شرق الراصد تماماً وتغرب في الساعة 6 بعد الظهر في غرب الراصد تماماً ؛ ويتساوى يومئذ طول كلٍ من الليل والنهار .

وقد استفاد هبارخوس من استخدامه الأرصاد المبكرة لأوقات شروق النجوم وغروبها ومن تحديد بداية الربيع ، فلاحظ أن هذه البداية تبدو مبكرة نوعاً ما في كل عام حين تقارن بشروق النجوم الثابتة . ونعبّر عن ذلك على نحوٍ مختلف بالقول إن هبارخوس اكتشف أن النجوم الثابتة تغير مواضعها قليلاً كل عام متجهةً نحو الشرق بالنسبة إلى الاعتدال الربيعي . وقد قدَّر هذا الانتقال تقديراً مبدئياً بأنه نحو درجة واحدة كل 75 عاماً . والرقم الصحيح بحسب القياس الحالي هو 50,2619 ثانية قوسية في العام . وهكذا فإن السنة الموسمية (أو الفترة بين انطباقين متتاليين للشمس مع الاعتدال الربيعي) هي أقصر بمقدار 20 دقيقة من مدة دوران الأرض حول الشمس (دوراناً نجومياً) ؛ وقد سُميت هذه الظاهرة « مبادرة الاعتدالين (أو تقدمهما) نحو الغرب » .

وكان سبب هذه المبادرة مجهولاً في ذلك الوقت ، ولكننا نعرف اليوم أن سبب ذلك هو أن الأرض ليست كروية تماماً وإنما هي كروانية Spheroid مفلطحة ، منبسطة عند القطبين ومنتفخة عند خط الاستواء ؛ لذلك فإن محور دوران الأرض لا يظل متجهاً في الاتجاه نفسه طيلة الوقت لأن الشمس والقمر يستمران في جذب الانتفاخ إليهما (فيؤثران بعزم فتلٍ في الانتفاخ) بحيث يدور محور الأرض في اتجاه الغرب دورة كاملة كل 26000 سنة ، أو بعبارة أخرى ليس القطب الشمالي نقطة ثابتة في القبة السماوية بل يتحرك غرباً على دائرة حول قطب دائرة البروج .

ولا شك أن هبارخوس كان فلكي عصره المبرِّز الذي تقدم بالعلم عامة وفي الفلك خاصة

أكثر من أي فلكي أتى قبله، وكانت أكبر مساهمة له هي استخدامه القياسات الدقيقة والرياضيات والمحاكمة اليقظة في تحليل المعطيات الفلكية، فإليه يرجع مفهوم قدْر النجم الذي يستخدمه الفلكيون اليوم للدلالة على مقدار لمعان النجم، وقد صنف هبارخوس النجوم في مراتب بحسب لمعانها الظاهري، كما استنتج من المدة التي يبقى فيها القمر مخسوفاً قيمة دقيقة إلى حدٍ ما لحجمِ القمر وبعده عن الأرض، ويُعتقد كذلك أنه ابتكر علم قياس المثلثات الذي يُعرف اليوم باسم حساب المثلثات، إلا أن تفاصيل هذا العلم لم تكتمل إلا على يد بطليموس. ومع أن تحريات هبارخوس الخاصة أقنعته بخطأ اعتقاد أرسطو بأن الأجرام السماوية تتحرك حول الأرض في دائرة، إلا أنه لم يجرب منحنيات أخرى كالقطوع الناقصة التي تعرف اليوم بأنها تمثل مدارات الكواكب، ولكنه جرَّب بدلاً من ذلك، هو ومن أتى بعده، تآلفاً من دوائر عُرفت باسم «دوائر التدوير» (إبّيسكلات)، بأمل الوصول إلى نموذجٍ للمنظومة الشمسية صالح لتفسير حركات الكواكب عبْرَ سماء الليل. وهكذا كان تأثيره كبيراً جداً لدرجة أن جهوده التي بذلها في تطوير نظرية مركزية الأرض رياضياً أعاقت كل مناقشة قيّمة حول مذهب أرسطرخوس في مركزية الشمس مدةِ تقرب من 16 قرناً.

ومع أن هبارخوس كان أعظم راصد فلكي في العصر اليوناني القديم، إلا أن عمله كان قد ضاع لو لم يكتب بطليموس (100-170 ب. م) كتابه المجسطى. ومع أن بطليموس عاش في مصر، إلا أن اسمه اللاتيني كلوديوس بطوليموس يشير إلى أنه كان يحمل صفة المواطن الروماني التي قد يكون مَنحها لأحد أجداده الامبراطور كلوديوس أونيرو[3]. وكان بطليموس رياضياً ضليعاً ولكنه لم يشتهر إلّا بعمله الفلكي الذي جمع فيه أكثر الأعمال الفلكية اليونانية الأولى بشمول شبيه بشمول سِفْر إقليدس في الهندسة. ولم يفترض بطليموس في قارئ كتابه (المجسطى) سوى معرفة الهندسة الإقليدية وفهم التعابير الفلكية الشائعة المألوفة، وهو يُرشد [القارئ] انطلاقاً من المبادئ الأولية وعبْر ما يلزمه من المعارف الكونية ومن الوسائل الرياضية إلى عرْض نظرية حركة الأجرام السماوية التي عرفها القدماء (الشمس والقمر وعطارد والزهرة والمريخ والمشتري وزحل والنجوم الثابتة، وكانت الأخيرة هذه تعد مثبتة كلها معاً على كرة واحدة متمركزة مع الأرض) وإلى عرْضِ الظواهر المختلفة المقترنة بها كالخسوف والكسوف[3].

ويعدّ كتاب بطليموس قصة كاملة عن الفلك القديم بالإضافة إلى تشديده على العهد الإسكندراني الذي هيمن عليه هبّارخوس. وقد عرض بطليموس في كتابه المجسطى نظرية دوائر التدوير كاملة ليشرح بها ما يتراءى للناظر من حركات الشمس والقمر والكواكب ضمن إطار يقوم على مركزية الأرض في المنظومة الشمسية. على أن بطليموس لم يقتصر على عرض عمل هبارخوس بل أكمله ووسّعه أيضاً في مناسبات عدة؛ فقد حسَّن طريقته في تصنيف النجوم بحسب أقدارها، وقد استمر العمل بهذه الطريقة حتى عام 1850، حين استُبدلت بها طريقة دقيقة لتصنيف أقدار النجوم

أدخلها بوغسون Pogson . ولا تقوم أهمية كتاب المجسطى على معلوماته الفلكية بقدر ما تقوم على منهجيته التي أدخلها في العلم ، ألا وهي التوفيق بين الأرصاد المتأنية الدقيقة والرياضيات . ومما يشهد على مهارة بطليموس الرياضية العظيمة وقوة حجته وتفكيره أنه ما من أحد استطاع أن يعرض طريقة أفضل من طريقة دوائر التدوير لتفسير حركات الكواكب .

العلم فيما قبل غاليليه

«حضارة كل عهد غذاء للتي تليها».
ــ سيريل كونولي*

هيمن على التفكير العلمي ما بين عامي 1500 و1600 ثلاث شخصيات كبيرة، هم نيقولاس كوبِّرنيق وتيخو براهه ويوهانس كِبْلر. وكان باستطاعتنا أن نخصّص هذا الفصل كله لهؤلاء لولا أن ذلك سيجعل قارئنا يتساءل متعجباً: لمَ هذا الفاصل الزمني الذي يقرب من 15 قرناً بين الفلك اليوناني وبداية الفلك الحديث. لذلك بدأنا بدراسة موجزة عن العلم في العصر الوسيط لكي نُظهر الفرق الشاسع بين عقيدة النقل المدرسانية Scholasties (اللاعلمية) Dogmatie في هذا العصر وبين اكتشافات كوبرنيق وبراهه وكبلر الرائعة. فمدرسانيو العصر الوسيط من أمثال هوغوسانت فكتور Hugo of Saint Victor وتوما الأكويني Thomas Aquinas كانوا يسعون إلى فهم العالم عن طريق توحيد الإيمان الديني والعقل في إطار فكري واحد. في حين حاول علماء النهضة الأوائل، ولا سيما كبلر، فهم العالم بالبحث عن نماذج رياضية (يمكن تقدير قيمها) تترابط فيها أرصادهم الفلكية. ومع أن المدرسيين طوّروا، من جملة ما طوّروا، براهين مثيرة على وجود الله، إلا أنهم لم يستطيعوا أن يقدموا بينة غير جدلية يدعمون بها استنتاجاتهم. في حين توصل كبلر بالمقابل، بعد ثلاثين عاماً من الجهد والعمل، إلى ثلاث علاقات رياضية بسيطة يمكن أن تصف حركات الكواكب في السماء. فاختياره المتكرر للنظرية مع المقابلة بالملاحظة هو نموذج مبكر لما ندعوه الآن العلم الحديث، وهو يدل على طريقة تجريبية لفهم العالم ظلت مناسبة حتى يومنا هذا.

ففي هذه الحقبة الطويلة بين بطليموس وكوبرنيق لم يتابع أحد سوى القليل من العلماء، فهي

* Cyril Connolly ناشر وناقد إنكليزي بدأ حياته صحفياً وأسس في عام (1903-) مجلة صغيرة أدبية Horizon كانت آخر نشرة لها في عام 1919.

لذلك يُشار إلى زمنها بأسماء منوعة مثل عصر الظلام والعصر الوسيط ، مع أن التقانة (التكنولوجية) تطورت فيه ، فساعدت طبعاً على نمو العلم الذي نشأ بعد ذلك ، إذ تقدمت تقدماً سريعاً الأدوات الملاحية والميقاتيات الميكانيكية والبارود والأسلحة النارية والغزل والنسيج والتعدين وصناعة الورق . وكانت الدرة التي زيّنت تاج هذه التقانة ابتكار غوتنبرغ في ميْنتْز Maintz عام 1436 آلة الطباعة . وعلى الرغم من أن ابتكار تقانة جديدة يتطلب تطبيق مبادئ علمية ، إلا أن مخترعي العصر الوسيط لم يعتمدوا على ركيزة من القوانين العلنية ، بل أنجزوا اختراعاتهم في واقع الأمر ، حتى من دون أن يعرفوا القوانين أو المبادئ العلمية المتعلقة بها ، فكانوا بذلك على النقيض من غاليليه الذي صنع أول مقراب Telescope باستخدام قانون انكسار الضوء .

ولكن لم تخل أوربة العصر الوسيط تماماً من أبحاثٍ في العلم البحت كما يتضح ذلك من أعمال روجربيكون Roger Bacon في القرن الثالث عشر ، وهو فرنسيسكاني* من أكسفورد صرَّح بأن « التلميذ الحقيقي هو من يعرف العلم الطبيعي بالتجربة » وعليه أن يرفض الآراء غير المختبرة التي تمليها سلطات غير معصومة ، فكان موقفه هذا موقفاً جريئاً بسبب تحديد مدرسية أرسطو وسانت أوغوسطين واللاهوتي المبجل ألبرت ماغنوس Magnus وتوما الأكويني . وهكذا عُدّ تحدي بيكون للسلطات التي لها الأمر تحدياً خطيراً وهرطقة ، وأُنّب وأُجبر على التخلي عن تدريسه للبصريات والميكانيك وتحريك السوائل ، هذا بالإضافة إلى النقد اللاذع الذي وجهه إليه رئيسه الفرنسيسكاني بأن « شجرة العلم تخدع عدداً من أبناء الحياة ، أو تعرِّضهم لأقسى العقوبات في المطهر Purgatory » .

ولكن سيطرة المفاهيم الأرسطية على تفكير العصر الوسيط لم تمنع من استمرار معارضة مفاهيمه في الحركة ومقاومتها ونقدها . ففي القرن الرابع عشر ، جادل ولْيم أوكام William Ockham مثلاً في أن الجسم لا يحتاج في حركته لتماسٍ فيزيائي مع « المحرك » لكي يحافظ على حركته كما رفض فكرة أرسطو بأن ما يُبقي الأجرام السماوية (الكواكب مثلاً) متحركة في مداراتها هو جوقة من الملائكة . وقد اقترح بديلاً عن ذلك ، أن الله ربما يكون قد زوّد هذه الأجرام بالحركة منذ البداية (وهذا نوع من المفهوم الإلهي للعطالة) . وكانت حجته في ذلك « أنه من العبث فعل الكثير لما يمكن أن يُفعل بالقليل » . وهكذا وُلد مبدأ « سيف أوكام » الذي كثيراً ما طُبق عندما يتعلق الأمر باختيار أبسط نظرية من بين عدة نظريات ممكنة .

ولقد أصبحت هذه الفكرة القائلة بدفعة إلهية ابتدائية فكرة شعبية شائعة تُفسَّر بها حركات الأجرام المشاهدة ، حتى أن نيكولاس كوزا Nicholas of Cusa أسقف بريكسن Brixen في القرن

---

* أي أنه من أتباع القديس فرنسيس ، وهي رهبنة نشأت في العصر الوسيط عُرفت بالتقشف .

الخامس عشر ، قَبِل بفكرة دوران الأرض على أنها ناشئة عن دفعة أُعطيت لها عند خلقها . وقد عبّر عن قبوله هذا بقوله إن الشخص أينما وُجد ــ على كوكب أو على نجم أو على الأرض ــ فإنه سيعتقد في قرارة نفسه أنه ساكن في مركز العلم بلا حراك وأن الأجرام الأخرى هي التي تتحرك حوله .

ولا جدال في أن أعظم عبقري عرفته نهاية العصر الوسيط وبداية عصر النهضة هو فنان القرن الخامس عشر الإيطالي ، المخترع والعالم ليوناردو دافينشي Da Vinci الذي تابع البحث في تحريك السوائل والميكانيك وعلم الأرض (الجيولوجية) . كما كان مهندساً معمارياً ومخترعاً غزير الإنتاج ، فقد وضع مئات التصاميم لجميع أنواع الآلات والأدوات ، وكانت تصاميمه تدل على معرفة عميقة بالمبادئ الفيزيائية والهندسية الأساسية التي كان يطبقها في أشغاله المعمارية وفي ابتكاراته . إلا أن ليوناردو لم يخلّف لنا ما يدل على أنه اكتشف أو صاغ أي قانون فيزيائي أساسي ، لذلك كانت مساهمته في الفيزياء إلى حدٍ ما ضعيفة جداً على الرغم من عبقريته العظيمة .

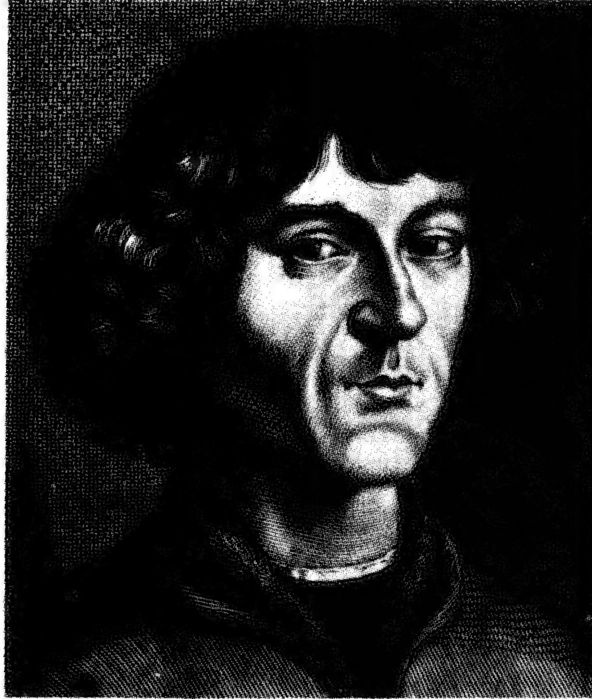
أما من طور الفيزياء في الفترة ما بين ليوناردو وغاليليه ، فهم في الدرجة الأولى كوبرنيق وبراهه وكبلر ، ومع أن هؤلاء عالجوا مسائل فلكية في المقام الأول ، إلا أن اكتشافاتهم تركت أثراً عظيماً في غاليليه وفي نيوتن الذي يمكن أن يُعدّ أول فيزيائي في العصر الحديث . ويُعدّ كوبرنيق (1473 - 1543) أعظم رمز لروح التساؤل الحديثة التي ظهرت في أوربة في القرن السادس عشر ؛ لأن ازدهار الفنون والثقافة كان سبباً في أن تصل الجرأة عند عدد قليل من الأفراد لأن يُعيدوا النظر في صلاح الفلسفة التي قامت عليها نظرية مركزية الأرض في الكون المقررة رسمياً .

ولد كوبرنيق في بولونية حيث كان والده تاجراً ناجحاً ، وحين بلغ العاشرة من عمره توفي والده ، فتولى أمره عمه لوكاس واتزلرود Lucas Watzelrod الذي أصبح أسقف إرملاند Ermland في عام 1489[1] . ولا يُعرف عن تربية نيكولاس المبكرة سوى القليل ، إلا أنه من المؤكد أنه في عام 1491 دخل جامعة كراكوفا ودرس فيها الرياضيات ، ثم ساعدت جهود عمه على اختياره كاهناً بين كهان كاتدرائية فراونْبرغ Frauenburg فضمن بذلك دخلاً مالياً سخياً مكنه من متابعة دراسته خارج بلاده . وقد سُجل كوبرنيق في جامعة بولونية Bologna في إيطالية في عام 1496 لدراسة القانون ، ولكن سرعان ما نما لديه اهتمام بالفلك ، فقام بأول رصد في تشرين الثاني / نوفمبر من عام 1500 ، إذ رصد خسوف القمر في روما ، وألقى في حشد واسع من الطلبة محاضرة عن هذا الرصد لقيت قبولاً حسناً[2] .

ومع أن كوبرنيق حصل على إذن من هيئة الكاتدرائية بأن يحضر دروس الطب ، إلا أنه فضل متابعة دراسات عليا في القانون ، فمُنح في عام 1503 درجة الدكتوراه في القانون الكنسي من جامعة فيرارا Ferrara وعاد إلى فارميا ، حيث قضى ما تبقى له من حياته . وكان كوبرنيق يتابع دراساته الفلكية سراً ، في حين كان يخصص معظم طاقاته لخدمة جماعته ؛ وفي عام 1513 اشترى كوبرنيق

ما يقرب من 800 حجر بناء وبرميلاً من الكلس ليبني بها برجاً صغيراً بدون سقف، لكي يقوم فيه بأرصاده الليلية[3]. وأخيراً أقنعته دراساته الواسعة للشمس والقمر والنجوم بخطأ نظرية مركزية الأرض، ولكنه لم يجرؤ على البوح بآرائه علانية. فلجأ بدلاً من ذلك إلى تأليف كتابه Commentariolus ليوثق وجهة نظره الخاصة بأن الشمس لا الأرض هي الساكنة، ثم أدار مخطوطته على أصدقائه المقربين. وكان تأثير نظرية أرسطرخوس عن مركزية الشمس واضحاً في تفكير كوبرنيق الذي فضل عن عمد ألا يعزو لليوناني أنه أول من بدأ الفكرة. ومهما يكن من أمر، فإن كتاب كوبرنيق المذكور Commentariolus، بغض النظر عن مصدر إلهامه، كان كتاباً ذا شأن، لا لتحديه الاحتكار الفكري الذي كان ينعم به النظام البطليموسي مدة طويلة، بل لأنه يشرح أيضاً دوران السماء اليومي الظاهري، وتجوال الشمس السنوي خلال دائرة البروج، وكذلك تبدل حركة الكواكب الظاهرية بين مباشرة (تقدمية) ورجعية (ارتجاعية)[4].

غير أن هذا لا يعني أن كوبرنيق كان على استعداد لأن يلقي بآخر آثار النظام البطليموسي جانباً، فلقد اعتقد مثل سلفه بطليموس بأن الكواكب تتحرك في مدارات دائرية حول الشمس، بل



نيكولاس كوبرنيق (1473-1543)

«إن كوبرنيق رأى أن النظام البطليموسي لم يكن مكتملاً اكتمالاً كافياً، وأنه لا يُقنع العقل كل القناعة، لأن بطليموس انطلق من التصورات الفيثاغورثية المسبقة بكل حرفيتها»[5]، وكان يعتقد بأن معظم الفلكيين كانوا يهتمون أكثر من اللازم بشرح حركة الكواكب ضمن إطار مركزية الأرض الذي كانت عيوبه تتكشف باطراد يوماً بعد يوم، ولم يهتموا بأي تفسير قد يتحدى الرأي السائد المتبع. وكان كوبرنيق يعرف الأنظمة الكونية القديمة والبطليموسية معرفة شاملة وكان يرفضها لأنها كانت معقدة على نحو غير ضرورية، ولأنها غير كاملة بحسب وجهة نظره. فهو يقول «إنهم (أي السابقون) في وضع يتوجب عليهم فيه إما حذف شيء أساسي، وإما أن يسلموا بشيءٍ دخيل لا علاقة له بالأمر كلياً» وكان متأكداً أن تعقيد دوائر التدوير (الإبيسيكلات) التي أدخلها بطليموس لكي يُفسر بها الحركات الظاهرية للشمس والقمر والكواكب نشأ عن أن حركات الأرض (مثلاً دورانها حول نفسها ودورانها حول الشمس) كانت قد نُسبت إلى هذه الأجرام، في حين لو ردت للأرض «حركاتها الحقيقية» لأصبحت حركات القمر والشمس والكواكب بسيطة للغاية. وقد رأى أنه لو وضعت الشمس في مركز المنظومة الشمسية، ودارت الأرض حول محورها الخاص وتحركت الشمس هي وبقية الكواكب، فإن معظم دوائر تدوير بطليموس يمكن أن تُطرح جانباً، وتكتسب المنظومة الشمسية تبعاً لذلك تناظراً جميلاً بالنسبة إلى الشمس يفتقر إليه النظام البطليموسي.

ولكن إصرار كوبرنيق على أن للأرض والكواكب مدارات دائرية يعني أنه كان عليه أن يُدخل دوائر تدوير خاصة به لكي يُفسر بعض الاختلال وعدم التناظر في الحركة الظاهرية للشمس والكواكب. والحقيقة أن طبيعة هذه الأمور لم تتضح كلياً إلا بعد اكتشافات كبلر الفلكية العظيمة. ولم يكن كوبرنيق نفسه فلكياً راصداً فحسب، بل حاول أن يستنتج نظامه الكوني من عددٍ قليل قدر الإمكان من البديهيات البسيطة، غير أن هذه البديهيات ضمت عدداً من المعتقدات اليونانية الخاطئة عن طبيعة الحركة، منها مثلاً أن حركات الأجرام السماوية يجب أن تكون دائرية منتظمة، وكانت حجته في وجوب ذلك لاهوتية محضة، وقد قبلها كوبرنيق وفقاً لمعتقده بأن كمال الأجرام السماوية يتطلب أن تتحرك هذه الأجرام على مدارات كاملة أي دوائر. والكمال الذي أشار إليه كوبرنيق هو ما يدعوه الفيزيائيون الآن التناظر الذي يقوم بدور هام في فيزياء عصرنا هذا. فالدائرة في سطح مستو تتمتع بأقصى ما يمكن من التناظر، بمعنى أن لها المنظر نفسه من أي جهة شئنا أن ننظر إليها في المستوي، في حين أن تناظر القطع الناقص أضعف من تناظر الدائرة.

ولم ينتشر نظام كوبرنيق القائم على مركزية الشمس إلا ببطء شديد، ويعود ذلك في المقام الأول إلى الاعتراضات اللاهوتية عليه، ثم إلى حركة الأرض الالتفافية، فقد كان من الصعب التوفيق بين هذه الحركة وشعور الناس بالاستقرار التام على الأرض، غير أن الكم الهائل الذي تجمع عن الأرصاد السماوية أدى في النتيجة إلى تزايد مستمر في عدد دوائر التدوير اللازمة لتفسير هذه

البيانات، مما جعل نموذج مركزية الأرض في النظام الشمسي يبدو أكثر تناقضاً وغير مقبول.

وترتبت على فرضية أن الأرض تدور حول الشمس نتيجة أخرى وهي أنها جعلت كوبرنيق يُدخل في حسابه حول المسافات التي يبدو أنها تفصل الشمس والكواكب عن النجوم: «أن السماء، حين تقارن مع الأرض، يبدو مظهرها هائلاً كأنها ذات قدر لا نهائي، في حين أن نسبة الأرض إلى السماء بتقدير الحواس كنسبة النقطة إلى الجسم، أو كنسبة المنتهي بالقدر إلى اللامنتهي»[6]. فكوبرنيق كان يتصور اعتماداً على نظرية ديموقريطس ولوكريتوس Lucretus الذرية «أن الكون ذو قدر لا نهائي وأن الأرض ليست سوى كوكب من جملة الكواكب».

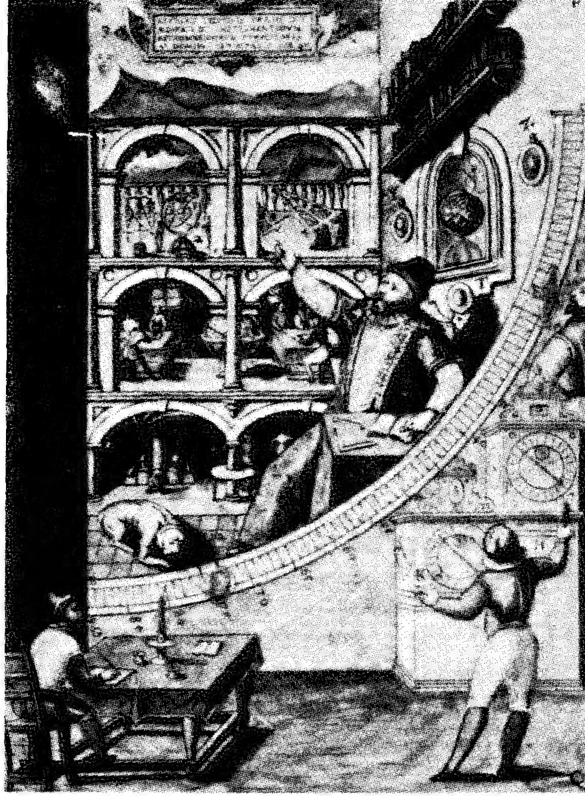
إن الذرات يمكن مضاعفتها إلى حد يمكن معه أن يصبح لدينا منها في النهاية ما يكفي لأن يؤلف قدراً يمكن إدراكه، وهذا ما يمكن أن يقال عن وضع الأرض. فمع أنها ليست في مركز الكون، إلا أن بعدها عن هذا المركز لا يُعد شيئاً هاماً، ولاسيما بالنسبة إلى كرة النجوم الثابتة[7].

ولم يصرِّح كوبرنيق أبداً تصريحاً واضحاً بأن الكون غير منته، لأنه كان لا يرغب في أن تضيع الشمس في فراغ لا نهائي، فهو في هذا الشأن محافظ يثير العجب، إذ فمع أنه لم يقلق كثيراً لإبعاد الأرض عن وضعها المركزي، فإنه كان غير قادر أن يحكم على الشمس بالمصير نفسه. ولكن الدلائل كانت تبدو مؤيدة لكونٍ لا نهائي ما دامت العين المجردة لا تستطيع أن تكشف الانزياح الصغير جداً في اختلاف المنظر* بالنسبة للنجوم لدى انتقالها الظاهري الناجم عن حركة الأرض السنوية؛ إلا أن كوبرنيق تخلص من اعتراضاته الفلسفية بأن صرف النظر عن الموضوع برمته ورفض أن يميز صفة الكون أهو نهائي أم لا نهائي.

وقد نُشر كتابه De Revolutionibus في عام 1543 في يوم وفاته، ولكن قرناً بأكمله انقضى ولم يظهر إلا قلة من المفكرين الجريئين الذين أعاروا نظريته القائمة على مركزية الشمس اهتماماً جدياً. وكان ذلك بفضل عمل ثلاثة علماء كبار ساهموا في النظرية، وهم براهه وكبلر وغاليليو (الذي مات عام 1643)، وكانت أرصاد كوبرنيق الفلكية ضئيلة هزيلة لا يتجاوز عددها 27؛ ولكن براهه قام بما هو أكثر من تعويض هذا النقص عدداً ودقة.

ولد تيخو براهه (1546-1601) في الدانمارك، وكان واحداً من عشرة أبناء لوالده أ. براهه Otto Brahe، الذي كان عضواً في مجلس شورى الملك ثم أصبح بعد ذلك حاكم قلعة هِلْزنْبورغ Helsinborg، وعاش تيخو الفتى مع عمه، وتلقى في بيته دروساً خصوصية منذ بلغ السابعة[8]. وفي عام 1559 بدأ ثلاث سنوات من الدراسة في جامعة لوذيران Lutheran في كوبنهاغن حيث ركّز

* أو زاوية اختلاف المنظر، parallax angle، وتسمى أيضاً الزيغ النجمي، إذ يبدو أي نجم ثابت في السماء كأنه يرسم قطعاً ناقصاً صغيراً خلال عام كامل من أعوام الأرض.



تيخو براهه (1546 - 1601)

على دراسة اللاتينية والأدب الكلاسيكي . وقد تأثر جداً بمجموعة محاضرات في الرياضيات عن التوافقيات الفيثاغورسية ، وبرز بصفته أرسطوطاليـاً متشدداً[9] . كما درس براهـه العلـوم ، ولا سيمـا أبحاث اليونانيين الكلاسيكية عن الفيزياء والرياضيات ، وخصص كثيراً من وقته لتعلم التنجيم . ومما دعم اهتمامه بالفلك وحثه على القيام بأرصاده الخاصة بالعين المجردة ، فرصة أتيحت له لرصد كسوف الشمس عام 1565 .

وفي عام 1562 ذهب براهه إلى جامعة لِيْبزغ بناء على إلحاحٍ من أسرته لكي يدرس القانون ، وكان يصاحبه معلم خاص هو أ. فيدل Anders Vedel والذي استُؤجر لكي يساعد براهه في دراسته القانونية ويمنعه من متابعة اهتمامه بالفلك الذي كان عم براهه يعتقد أنه مضيعة للوقت . غير أن براهه لم يمتنع عن ذلك ، فكان يتسلل في أثناء نوم معلمه لكي يدرس النجوم[10] . وكان يصرف ما

يستطيع توفيره من المال على الكتب والأدوات الفلكية . ثم عاد بعد إنهائه دراسته في ليبزغ عام 1565 إلى كوبنهاغن ، وهناك وجد نفسه متورطاً في نزاعٍ مع دانماركي نبيل آخر ، مما أدى إلى مبارزة بينهما أسفرت عن قطع جزءٍ من أنف براهه . فكان براهه طيلة ما بقي من حياته يخفي جرحه بغطاء فضي أو نحاسي . وعندما فتح قبره في عام 1901 « وجدت لطخة خضراء براقة على جمجمته عند الطرف العلوي من فتحة الأنف »[11] .

وقد وجد براهه ذريعة صغيرة لكي يبقى في الدانمارك ، فأمضى هناك عاماً في جامعة بازال Basal وانتقل بعدئذ إلى أوغسبورغ Augsburg حيث بدأ بدراسات فلكية مطولة واستخدم أدوات من اختراعه الخاص ، فكانت تضم ربعيةً (أو ذات الربع) مصنوعة من قطعة كبيرة من الخشب يبلغ قطرها قرابة 19 قدماً ، وكذلك ذات السدس صغيرة يمكن حملها ، هذا بالإضافة إلى كرة قطرها خمسة أقدام لكي يرسم عليها خارطة مفصلة تحدد مواضع النجوم والكوكبات[12] .

وقد لاحظ براهه في 11 نوفمبر / تشرين ثاني من عام 1572 إشعاعاً ضوئياً براقاً لم يُشاهده من قبل في كوكبة ذات الكرسي ، وبعد سلسلة من القياسات لتحديد وضعه بالنسبة إلى النجوم المجاورة ، أظهرت هذه القياسات عدم وجود أي تغير خلال العامين التاليين فاستنتج من ذلك أنه كان ينظر بالفعل إلىٰ نجم جديد لا إلى قمر مرافق كما خُيّل إليه في البدء[13] . وقد سجل أرصاده لهذا « المستعر » Nova بكل عناية واحتفظ بها ، فأصبحت بعد ذلك مصدراً نفيساً من المعلومات لمن أتى بعده من العلماء والمؤرخين .

كان الفلك الرصدي (أو الوصفي) آنئذ في حالة يرثى لها ، ولم يكن هناك من يهتم بدقة الأرصاد ، لذلك فكر براهه ، وكان على حق ، بأن ما يمكن تحقيقه من تقدم في الفلك سيكون ضئيلاً إن لم تكن هناك خطة مرسومة ومستمرة للقيام برصد النجوم والكواكب . وكان من محاسن الصدف أن دُعي براهه من قبل فريدريك الثاني ملك الدانمارك لكي يبني مرصداً في الجزيرة الدانماركية فين Hveen الواقعة في لسان كوبنهاغن البحري . فجهزه براهه بأحسن الأدوات المتيسرة التي تعتمد العين المجردة ، وهكذا جمع بين عامي 1576 و1597 مجموعة هائلة من المعلومات الدقيقة جداً . ونظراً إلى أنه كان راصداً بارعاً بعينه المجردة ، استطاع أن يزيد كثيراً من دقة الرصد ، فكانت أعماله عاملاً حاسماً في اكتشاف كبلر لقوانينه الثلاثة عن حركات الكواكب . والحقيقة أن أرصاد براهه بلغت أقصى حدود الدقة بالعين المجردة ، هذا بالإضافة إلى أنه جمع مكتبة شخصية وضخمة من المخطوطات الفلكية وصنف مجموعة واسعة من الأرصاد الدقيقة . وكان يعتقد بأن العلم لا يمكن أن يتقدم إلا ضمن إطار نظري رحب ، إلا أنه ظل متشبثاً بنظرية معدلة عن مركزية الأرض لم تكن لها قيمة تذكر بالنسبة لأعماله في الرصد .

وفي عام 1597 توفي فريدريك الثاني ، فاضطر براهه لأن يبحث عن دعم مالي في مكان

آخر . وكان يفكر ، بعد نفورٍ حدث بينه وبين البلاط الدانماركي بأن يعود إلى الإقامة في هولاندة ، إلا أن أصدقاءه نصحوه بالرحيل إلى براغ لمقابلة الامبراطور ، وقد كان هذا الأخير عطوفاً ودوداً ، فاتخذ إجراءاته لكي يتلقى براهه دعماً مالياً وأن يستخدم قلعة بناتكي Benatky في شمال شرق براغ حيث بنى براهه مخبراً ومرصداً[14] . إلا أنه لم يستطع أبداً أن يوفر جهوده على نحو ملائم . فتضافرت ظروف العمل الصعبة مع سوء صحته ومنعته من القيام بمزيد من الأرصاد المهمة .

وكان براهه قد دعا في آخر سنة من حياته في براغ عام 1590 ، الفلكي الألماني الشاب يوهانس كبلر ليكون مساعداً له . وكان قد سبق لكبلر هذا أن تحول إلى الاعتقاد بالنظام الكوبرنيقي ، فقبل الدعوة بحماس ، لأنه كان يرى في نتائج أرصاد براهه ما كان يحتاجه تماماً للبرهان رياضياً على صحة نظام كوبرنيق . إلا أنهما كانا يتخاصمان غالباً بضراوة ، على الرغم من أن مواهب كبلر الرياضية كانت تكمل قدرات براهه في الرصد . ومع ذلك اعترف كل منهما بارتباطه بالآخر ، وقامت بينهما مشاركة واهنة دامت حتى موت براهه . وقد ورث كبلر جداول براهه ومركزه في براغ في عام 1601 فاستطاع بذلك أن يبدأ عمله الخالد عن مدارات الكواكب ، وأن يتمّه بعدما يقرب من ثلاثين عاماً .

كان ما يشغل يوهانس كبلر (1571-1630) خلال حياته علاقات التوافق الإلهي في الكون . فقوانينه الثلاثة عن حركة الكواكب ، التي أتت نتيجة سنوات عديدة من الحسابات المضنية ، لم تكن سوى نتيجة ثانوية لبحثه الدؤوب عن العلاقات الرياضية التي يمكن أن توضح حركات الأجرام السماوية ولا سيما الكواكب . وهكذا خفف اطلاعه الجيد على معايب النظرية الكوبرنيقية من حماسه لها ، لأنه كان يفضل أن يكون للكواكب مدارات دائرية ، الأمر الذي كان يؤدي دائماً إلى تعارض بين توقعاته وبين الأوضاع المشاهدة للكواكب .

على أن كبلر ، وإنْ كان يملك فكراً رائعاً ومقدرة فائقة على التركيز ، إلا أنه كان رجلاً حساساً لا يقبل النقد بسهولة . ولعل طبيعته الغريبة بعض الشيء كانت قد تكونت نتيجة طفولته البائسة ، فوالده هينريخ ، كان مرتزقاً سيىء المزاج قاتل في عدد من الحملات العسكرية ، وفي النهاية هجر أسرته في عام 1584[15] . وكانت أمه كاترينا امرأة فضولية منغّصة لا تستطيع أن تعالج فقر أسرتها ، وأصبح كبلر في الأخير مشوشاً ، إذ قضى ثلاث سنوات في حالة مضنية وعجز مالي وهو يدافع عن والدته في نزاع قانوني مفنِّداً ما أتهمت به من ممارسة العرافة والشعوذة وبعد ذلك ، ترك أسرته فقيرة معوزة[16] .

تلقى كبلر الفتى دراسته الأولى في ليونبرغ Leonberg وكان مبرزاً في اللاتينية ، ثم تسجل في دير أدلبرغ Adelberg في عام 1584 . وبعد سنتين بدأ تعلمه التحضيري في مولبرون Maulbronn . وفي عام 1589 بدأ دراسته الفلكية في جامعة توبنغن Tubengen . وكان أستاذه م. مايستلن



يوهانس كبلر (1571-1630)

M.Maestlin قد غذى فيه الاهتمام بنظرية كوبرنيق[17]. وبعد حصوله على درجة الماجستير في عام 1591، بدأ دراسة اللاهوت، ولكن وفاة ج. ستاديوس G.Stadius الذي كان أستاذ الرياضيات في مدرسة غراز Graz، أحدثت شاغراً في الوظيفة، فاستدعي كبلر لملئه[18] والحقيقة أن كبلر لم يكن يبدي اهتماماً بالرياضيات في بادئ الأمر، إلا أنه قبل هذا المركز وتخلى عن كل نية قد تطرأ بعد ذلك لأن يصبح كاهناً (أو رجل دين).

وكان كبلر يخصص إلى جانب قيامه بالتعليم ودروسه الخصوصية كثيراً من وقته لتأليف تقويم تنجيمي أطلق فيه عدداً من التنبؤات التي حدثت بعد ذلك مثل انتفاضة الفلاحين والطقس الجاف؛ وهذا ما عزّز شهرته المحلية[19]. ثم أصدر عدة طبعات من تقويمه عن الأعوام القليلة التالية، التي كان يبني عليها تنبؤاته. وعلى الرغم من أنه كان ينبذ على الصعيد الشعبي عدم الجدوى العلمية في التنجيم ويقاومها، إلا أنه لم يستطع أن يتجنب الانجراف إليها، لأنه كان يعتقد أن ثمة نوعاً من العلاقة الغامضة التي تقوم بين مصير فعاليات الإنسان وبين حركات النجوم والكواكب. ومع ذلك، فإن تقاويمه كانت تزوّده بمورد ثابت من الدخل، كما أن مهاراته التنجيمية كانت فيما بعد مفيدة له في حصوله على منصب، هو «رياضي امبراطوري»[20].

أضف إلى ذلك أن اهتمامات كبلر في التنجيم أوحت إليه بأول عمل في الكونيات سماه «سر الكون» The mystery of the universe وقد ظهر عام 1597 «وكان يبحث فيه عن التوافق الرياضي بين مدارات الكواكب في النظام الكوبرنيقي، إذ رأى أن كثيرات الوجوه الخمسة المنتظمة يمكن أن تجد أمكنتها الملائمة بين كرات مدارات الكواكب»[21]. وهكذا أقنعته النتيجة التي وصل إليها، وهي أن كثيرات الوجوه الخمسة المنتظمة تقابل تقريباً مدارات الكواكب المعروفة، بأن للكون أساساً هندسياً، وأنه لا يمكن أن يوجد سوى خمسة كواكب، لأنه لا يوجد غير خمسة كثيرات وجوه منتظمة. وهذه نتيجة ليس لها طبعاً أساس من الواقع، ولكن إصراره العنيد على حقيقتها تظهر إلى أي مدى كانت نظرته الهندسية تحفز تفكيره.

ومع أن كبلر كان يرى أن نموذجه الهندسي السابق هو أعظم إنجازاته، إلا أن عمله الذي اشتُهر به فعلاً، أي قوانينه الثلاثة عن حركة الكواكب، بدأ عندما حصل على وصية براهه وهو على فراش الموت، وهي أن يستعمل جداول أرصاد براهه لكي يبرهن منها على نظرية براهه في مركزية الأرض. وكان كبلر نفسه معنياً في المقام الأول بمدار المريخ، إذ ظهر له أن مداره يمكن أن يكون أي شيء غير الدائرة، وكان بذلك يتحدى وبشدة نظرية كوبرنيق القائلة: «بأن الكوكب يتحرك بانتظام في مدار دائري». ولكن قناعته بأن كوبرنيق كان على حق بكل شيء جعلته يمضي ساعات عديدة بلا فائدة وهو يحاول بشق النفس أن يجعل معطيات براهه عن مدار المريخ تتفق مع كونه دائرياً، حتى لقد كاد ينجح. ولكن الدائرة التي أنشأها لكي تلائم المعطيات انزاحت عن أرصاد براهه

بثماني دقائق قوسية لذلك استبعد، وهو كاره، فكرة مدار دائري للمريخ لأنه كان يعرف أن براهه كان راصداً دقيقاً جداً لا يمكن أن يرتكب خطأً كبيراً كهذا يبلغ ثماني دقائق قوسية.

وعندئذ التفت كبلر إلى مدارات ممكنة أخرى، فاختار في النهاية القطع الناقص الذي لم يفكر فيه كثيراً من قبل، لأنه يفتقر إلى تناظر الدائرة التام، ولكنّ للقطع الناقص تناظراً بسيطاً مميزاً بالنسبة إلى قطره الكبير ـــ الذي يسمى المحور الرئيسي ـــ ويتضح هذا التناظر مباشرة من تعريف القطع الناقص مثلما هو وارد في طريقة إنشائه التالية: ارسم على قطعة من الورق خطاً مستقيماً ذا طول معين بين نقطتين: ب وبَ ثم عين نقطتين ق وقَ على هذه القطعة بحيث يكون بعد ق عن ب مساوياً لبعد قَ عن بَ. خذ خيطاً طوله ب بَ وثبت أحد طرفيه عند ق والطرف الآخر عند قَ، ثم ضع قلماً في عروة الخيط، وحافظ عليه مشدوداً قدر الإمكان، وارسم على الورقة قطعاً ناقصاً برأس القلم. إن النقطتين ق وقَ تدعيان محرقي القطع الناقص، ويدعى الطول ب بَ قطره الكبير، أو «محوره الأساسي الكبير». ويمكن الحصول على أشكال ناقصية مختلفة بتقريب النقطتين ق وقَ إحداهما من الأخرى (فيقترب الشكل من أن يكون دائرياً أكثر فأكثر، أو بإبعاد إحداهما عن الأخرى لتقتربا من ب وبَ فيصبح الشكل أكثر تفلطحاً حتى ينتهي إلى قطعة مستقيمة).

إن قانون كبلر الأول عن حركة الكواكب يعتمد على القطع الناقص، إذ ينص على ما يلي: يتحرك كل كوكب على قطع ناقص حول الشمس التي تقع في أحد محرقيْ القطع الناقص، وعلى هذا فإن الشمس يجب أن تكون في أحد محرقيْ كل كوكب، أو بعبارة أخرى: يجب أن يكون لجميع مدارات الكواكب الناقصية محرق واحد مشترك. وهذه العبارة هي أول مثال في تاريخ العلم عن قانون فيزيائي يطبق على حركة الأجسام، وهي أيضاً أول مثال عن العلاقة المتميزة بين تحريك الأجسام المتحركة والرياضيات.

ومن المفيد أن يُنظر إلى القطع الناقص من وجهة نظر أخرى تفسِّر تسميته قطعاً مخروطياً (وتُلقي مزيداً من الضوء على مدارات الكواكب)، وتتضح هذه التسمية مما يلي: إذا قطعنا مخروطاً دائرياً قائماً قطعاً عشوائياً إلى جزأين، فإن محيط قاعدة الجزء العلوي هو بوجه عام قطع ناقص، ويتوقف شكل هذا الخط المحيطي على ميْل المقطع بالنسبة إلى قاعدة المخروط ولا يكون الشكل دائرياً إلا إذا كان المقطع موازياً تماماً للقاعدة. فاحتمال أن يكون المقطع بقطعٍ عشوائي دائرةً يساوي الصفر، وهذا يعني أن احتمال الحصول على مدار دائري لأحد الكواكب يساوي هو أيضاً الصفر، وهو أمر سنوليه عناية أكثر عندما ندرس كيف استنتج نيوتن قوانين كبلر. على أن هناك قطعين مخروطيين آخريْن هما القطع المكافىء والقطع الزائد، وكل منهما يمكن أن يكون مداراً للأجرام السماوية.

دعونا نَعُدْ إلى رسم القطع الناقص بالخيط: إن مجموع بعد رأس القلم عن المحرق قَ مع

بعده عن المحرق ق يساوي دائماً طول الخيط الذي يساوي أيضاً طول المحور الرئيسي، لذلك غالباً ما يُعرف القطع الناقص على أنه المحل الهندسي لجميع النقط التي مجموع بعديْ كل منها عن نقطتين مثبتتين (المحرقين) ثابت. إن هذا الثابت أو نصفه (أي نصف المحور الرئيسي كما دعوناه) هو وسيط هام في القطع الناقص لأنه يحدِّد قدر القطع.

وثمة وسيط آخر في القطع الناقص هو التباعد المركزي، فهو يحدد مظهر القطع الناقص وله دور مهم في دراسة هندسته، وتتغير قيمته من 1 إلى الصفر وهو، في حقيقة الأمر، قياس لمقدار ابتعاد القطع عن الشكل الدائري، فحين يقترب المحرقان من مركز القطع (وهي النقطة الواقعة في منتصف المسافة بين ب وبَ) نقترب قيمة التباعد المركزي من الصفر ويصبح القطع أقرب إلى الدائرة ـــ فالقطع يصبح دائرة حين ينطبق المحرقان ق وقَ على المنتصف، أي على المركز ـــ كذلك كلما ازدادت المسافة الفاصلة بين ق وقَ، اقتربت قيمة التباعد المركزي من 1 وأصبح القطع أكثر تفلطحاً، فهو يصبح قطعة مستقيمة حين تنطبق ق وقَ بالترتيب على ب وبَ.

لقد اكتشف كبلر هذا القانون الأول لحركة الكواكب (أي المدارات الاهليلجية) بطريقة اختبارية حسية، أي بطريق المحاولة والخطأ ومن دون أن يعرف المدلول الفيزيائي لوسيطي القطع الناقص الهندسيين اللذين شرحناهما منذ قليل ـــ أي قدر القطع ومظهره ـــ وسيتضح مدلول هذين الوسيطين التحريكي عندما نبين كيف تأتي قوانين كبلر الثلاثة لحركة الكواكب نتيجة طبيعية تماماً لقوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة أو الجاذبية.

والأمر المدهش فعلاً هو أن كبلر اكتشف طبيعة مدارات الكواكب الهندسية من دون أن يكون لديه أي مبدأ من المبادئ العلمية الأساسية يهتدي به، إذ كان عليه أن يتخلى عن أي فكرة مسبقة عن «المدارات التامة» لكي يصل إلى ما وصل إليه. فاكتشاف كبلر لهذا القانون الأول لم يُرض تشوقه إلى معرفة شاملة عن حركة الكواكب، ولكنه كشف له عن الطريق الذي يجب أن يسير عليه لكي يصل إلى فهم أشمل. لقد رأى أن التخلي عن المدارات الدائرية كان يعني رفض الحركة المنتظمة أيضاً. وهكذا بدأ دراسته لحركات الكواكب، وهو يستهدف إيجاد شيء لا يمكن أن يتغير في حركة الكوكب حول الشمس حتى ولو تغيرت سرعته، فكان بحثه هذا مُجدياً جداً، لأنه أوصله إلى اكتشاف قانونيْه الآخرين عن حركات الكواكب، وهما قانون المساحات والقانون التوافقي.

أما اكتشافه لقانونه الثاني ـــ أي قانون المساحات ـــ فيشهد على عظم عبقريته وعلى مهارته الرياضية الرائعة. ذلك لأن قانون المساحات لا يأتي على ذكر أي شيء عن سرعة الكوكب مباشرة، بل يتحدث بالأحرى عن الطريقة التي تتغير بحسبها إحدى سمات القطع الناقص الهندسية المرتبطة بحركة الكوكب، فلا بد أنه كان لكبلر بصيرة نافذة وحدس قوي لكي يكتشف هذا القانون الذي

ينص على ما يلي : إن الخط الواصل من الشمس إلى الكوكب أو ما يسمى « نصف القطر المتجهي » للكوكب يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية .

فكبلر إذاً كان عليه أن يمضي في أثناء اكتشافه لهذا القانون إلى ما هو أبعد من أرصاد براهه ، إذ كان عليه أن يحسب مساحة القطاعات المختلفة من القطع الناقص ، أو أشباه المثلثات (الأسافين) التي تحددها الخطوط الواصلة من الشمس إلى الكوكب عند مختلف النقاط على مداره ، وهذا عمل كان لا بد أن يؤدي إلى أعمال حسابية وجبرية ومثلثاتية مملة مجهدة إلى أبعد الحدود ، إلا أنه قاد كبلر في النهاية إلى قانون المساحات الشهير . فهذا القانون ينص على أن مساحة قطاع القطع الناقص الذي يمسحه الخط الواصل من الشمس إلى الكوكب في مدة معينة ، هو نفسه دائماً بغض النظر عن الوضع الذي يكون فيه الكوكب على مداره . غير أن هذا القانون يُذكر عادة على النحو التالي : إن نصف القطر المتجهي من الشمس إلى كوكبٍ معين ، يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية . والحقيقة أن هذا القانون المتميز هو أول مثال عن منطوق أحد مبادئ الانحفاظ في العلم ، مع أن كبلر نفسه لم يكن عارفاً بتكافؤ قانونه هذا مع مبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي الذي سيأتي شرحه في دراستنا لقانون نيوتن في الثقالة (الفصل السادس) .

وأما القانون الثالث لحركة الكواكب ــ أو القانون التوافقي ــ فقد أعلن عنه كبلر في كتابه « توافق الكون » The harmony of the World الذي نشر عام 1618 . ويلجأ كبلر في هذا الكتاب ، كما فعل في تحرياته السابقة ، إلى طريقة المحاولة والخطأ ، فيختبر جميع أشكال التوفيقات العددية بين أدوار الكواكب وأبعادها المتوسطة عن الشمس . وكان عمله مجهداً ومفصلاً إلى أبعد الحدود ، ولكنه ظل مثابراً حتى وجد العلاقة الصحيحة بين دور كل كوكب حول الشمس (أي السنة الكوكبية) ومتوسط بعده عن الشمس ، فكان نص هذه العلاقة كما يلي : إن مربع دور الكوكب (أو مدة سنته) يتناسب مع مكعب متوسط بعده عن الشمس .

ويعني هذا القانون ، حسبما نص عليه كبلر ، أن ناتج قسمة مربع دور الكوكب على مكعب متوسط بعده عن الشمس مقدار ثابت لا تتغير قيمته بالتالي من كوكب لآخر . ولذلك كان في نظر كبلر أعظم انجازاته لأنه يمثل ثمرة 16 عاماً من أغزر مراحل حياته إنتاجاً ، « ولأجله ــ كما قال ــ التحقت بتيخو براهه ، ولأجله أقمت في براغ » .

على أننا سنرى عند دراستنا لقانون نيوتن في الثقالة أن قانون كبلر الثالث كما نص عليه هو نفسه ، ليس صحيحاً كل الصحة ، لأنه حين يُستنتج من قانون نيوتن يأخذ منطوقاً يختلف من منطوق كبلر في أن ناتج قسمة مربع دور الكوكب على مكعب متوسط بعده عن الشمس ليس ثابتاً بل يتغير تغيراً طفيفاً من كوكب لآخر ، ولكن هذا التغير أقل من أن يُكتشف من أرصاد براهه . وهكذا فإن منطوق القانون الثالث يتفق مع بيانات براهه ، ولكنه لا يتفق تماماً مع قانون الثقاله .

وكان كبلر يعرف أن حركة الكواكب تتحكم فيها قوة شمسية ولكنه مع ذلك لم يطابق بينها وبين الثقالة الأرضية، بل إنه أساء فهم طبيعتها، فقد ظن أنها شبيهة بقوة مغنطيسية تزداد مع تناقص المسافة لا مع مربع المسافة، وأنها قوة تؤثر جانبياً، أي تؤثر في الكوكب في منحى عمودي على الخط الواصل بين الشمس والكوكب، بدلاً من أن تكون على الخط نفسه في اتجاه الشمس. بل كان يعتقد فضلاً عن ذلك، أن هذه القوة، إذا تلاشت، فإن الكواكب ستتوقف جامدة في مساراتها المدارية بدلاً من أن تستمر في حركتها.

وقد درس كبلر البصريات وصمم مقراباً ربما صنعه هو، ولكنه لم يستعمله أبداً. كما اكتشف قانون التربيع العكسي الذي يُظهر التناقص في تألق منبع ضوئي، إذ لاحظ حدسياً أن الضوء الصادر عن منبع ضعيف ينتشر كروياً وأن تألق هذا المنبع يتغير، بسبب ذلك، متناسباً عكسياً مع مربع بعد المراقب عن المنبع. وبحث كبلر انكسار الضوء وبيّن أن قانون بطليموس التقريبي في الانكسار ــ وهو أن زاوية الانكسار (أي زاوية انعطاف المسار الضوئي) تتناسب مع زاوية الورود ــ يصح في حالة زوايا ورود صغيرة فقط، إلا أنه لم يكتشف قانون الانكسار الصحيح الذي اكتشفه في عام 1621 أستاذ للرياضيات في ليْدن معاصر لكبلر هو و. سنِل W.Snell .

وفي عام 1621 أتم كبلر كتابه مختصر الفلك الكوبرنيقي الذي عرض فيه وجهة نظره عن كيفية تعديل النظرية الكوبرنيقية منذ ظهورها لأول مرة، وبين كيف أن مساهمته الجوهرية غيّرت علم الكونيات من علم تأملي موضوعه غير دقيق إلى علم هو في الوقت نفسه موحد نظرياً ورائع رياضياً. وكان منهج كبلر عندما يحاول دراسة موضوعه يعتمد على اعتقاده بأن الفلك يتألف من خمسة أقسام «أولاً: ملاحظة السماء، وثانياً: فرضيات لتفسير الحركات الظاهرية الملاحظة، وثالثاً: فيزياء أو ميتافيزياء الكونيات، ورابعاً: حساب أوضاع الأجرام السماوية سابقاً ومستقبلاً، وخامساً: قسم ميكانيكي يعالج طريقة صنع الأدوات واستعمالها[22]. وقد أصبح هذا الكتاب في حينه أوسع الكتب الفلكية انتشاراً في أوربة لأنه كان يتضمن قوانين كبلر الثلاثة لحركة الكواكب، كما كان يصف مركزية الشمس بتفصيل لا سابق له.

ثم إن كبلر أمضى ما يقرب من 30 سنة وهو يعمل على إعداد الجداول الرودُلْفيه التي أكملت بيانات أرصاد براهه وأبحاثه هو عن حركات الكواكب. وكان هدفه وضع خلاصة وافية لا سابق لدقتها عن مدارات الكواكب؛ وقد كان السبب في تأخر ظهور هذه الجداول حتى عام 1627 راجعاً إلى متطلبات طبعها المعقدة من جهة وكذلك إلى وفرة رسومها.

يحوي المجلد المطبوع من كتاب Tabulae Rudolphinae 120 صفحة مزدوجه تتضمن نصائح وتوجيهات لاستعمال الجداول، بالإضافة إلى 119 صفحة من الجداول. ويتضمن الكتاب إلى جانب جداول الكواكب والشمس والقمر وجداول اللغرتمات المرافقة له، زيج (كتالوغ) ألفٍ من النجوم الثابتة

وموجزاً ميقاتياً (مرتباً زمنياً) ولائحة بالمواضع الجغرافية . كما تضمنت بعض النسخ خارطة كبيرة مطوية للعالم بقياس 40x65 سنتيمتر ، وكانت قد نقشت هذه الخارطة عام 1630 ، ولكن يبدو أن هذه النسخ لم تُوزع إلا بعد عدة سنوات . وينفرد كتاب كبلر هذا بأن فيه صورة منقوشة على الغلاف ــ مليئة بالرموز الباروكية (الزخرفية) المعقدة ــ وهي تمثل معبد الإلهة يوُرانيا (إلهة الفلك والهندسة وتمثّل بالكرة والفرجار) ومعها نظام تيخو براهه مرسوم على السماء....[23]

وقد أقنع كبلر الامبراطور فرديناند الثاني بأن يوافق على فرض ضريبة على ثلاث مدن لكي يدفع إلى كبلر مبلغ 6300 غولدن كتعويض عن خدماته للقصر مقابل موافقة كبلر على نشر جداوله في النمسا[24] . ومع أن كبلر لم يستطع أن يجمع إلا ثلث المبلغ المترتب له تقريباً ، فإنه تمكن من تمويل طبع الكتاب في لينز Linz في عام 1624 . وما أن أقام كبلر في مسكنه الجديد في لينز حتى اندلعت حركة الإصلاح المعاكس في أوربة وأتت بالحرب إلى باب كبلر . فحوصرت لينتز وأُحرقت المطبعة عن آخرها . وقد خشي كبلر عندئذ ألا يستطيع أبداً طبع جداوله فحزم كل حاجياته وانتقل إلى أولم (في ألمانية) حيث عثر على صاحب مطبعة جديد وأشرف بنفسه على إخراج الكتاب . ولم يكن كبلر راغباً في خسارة رواتبه بصفته الرياضي الامبراطوري الاقليمي ، لذلك لم يشأ أن يسافر إلى إيطالية أو هولاندة (اللتين كانتا خارج نطاق سيطرة الامبراطور) ، على الرغم من أن الغليان الديني والسياسي المستمر جعله يفكر بذلك[25] . وهكذا أمضى كبلر سنواته الأخيرة متنقلاً بين عواصم وسط أوربة حيث كان يمارس قراءة الطالع لكل من يُحسن إليه ، كما أتم كتابه « الحلم » قبل وفاته بزمن قصير ، فكان هذا الكتاب نزوة خيالية متميزة ، لأن « وصفه المتبصر الفاهم لحركات السماء كما ترى من القمر أثارت جدلاً ذكياً لصالح النظام الكوبرنيقي »[26] . ولكن الكتاب لم يُنشر إلا بعد وفاة كبلر ، وذلك عندما باعه ابنه للناشر لكي يكمل دفع ديون مستحقة على الأسرة .

كان كبلر في طريقة بحثه العلمي وفي ممارسته له ، أقرب من جميع من سبقوه إلى نموذج العالِم الحديث . فمع أنه كان خيالياً إلى حد بعيد وحالماً ، إلا أنه لم يكتف يوماً بنظرية أو فرضية لا شكل لها ولا بنية ، فكان يرى أنه يجب أن تُصاغ النظريات والفرضيات صياغة دقيقة بحيث يمكن اختبارها بالأرصاد الدقيقة . وكانت المعطيات المشاهدة عند كبلر هي المحك أو المعيار النهائي الذي يجب أن تحتكم إليه كل النظريات ، ولم يحجم أبداً عن تطبيق هذه الأسس على نظرياته الخاصة .

فيزياء غاليليه

«لن نستطيع هنا وفي أي مجال آخر التمعن في داخل الأشياء على أفضل وجه إلا إذا رأيناها فعلاً وهي تنمو منذ البداية».

ــ أرسطو*

على الرغم من أن غاليليو غاليليه Galelio Galilei (1564-1642) كان معاصراً ليوهانس كبلر ، إلا أن العالِميْن نادراً ما اتصل أحدهما بالآخر ، ولم يشتركا إلا بالقليل ، ومع ذلك فقد كانا مسؤوليْن عن إرساء أسس العلم التي جعلت مساهمة نيوتن في دراسة الميكانيك أمراً ممكناً . ولربما لم يكن لغاليليو مواهب كبلر الرياضية ، ولكن اهتماماته المهنية كانت أكثر تنوعاً ، كما لم يجاره أحد في اللجوء إلى التجارب لإيضاح الظواهر الفيزيائية ، كما فعل مثلاً فيما يتعلق بسقوط الأجسام الحر . وكان ، إضافة إلى ذلك ، حِرَفياً مجدداً استطاع أن يصنع أدواته مثل مقراباته المحسنة ، التي ساعدت على التوصل إلى اكتشافات فلكية مهمة ووسعت إلى حد بعيد مجالات الرصد في الكون .

ولد غاليليو لأب فلورنسي تاجر قبل موت ميكل أنجلو بثلاثة أيام ، وكان العلم آنذاك في بواكير أيامه والتساؤلات المدرسية الفكرية كانت مثقلة بالسلطة القوية لأصحاب العقيدة البابوية اللاعلمية Dogmatie ، في حين كان والد غاليليو يرى أنه ما من أسباب تمنع تشجيع تبادل الأفكار الحر ، لذلك لا شك أنه نقل حماسه للنقاش الحر في أي ميدان إلى ابنه غاليليو الذي تلقى ، وهو بعد فتى ، تعليمه الأول في دير فولومبروزا Vollombrosa قرب فلورنسة ، ثم درس الرياضيات في جامعة بيزا . وبعد ما عمل محاضراً في أكاديمية فلورنسة ، بدأ يدرس الرياضيات في جامعة بيزا في عام 1592 وكانت السنوات الثمانية عشر التي قضاها في الكلية في بيزا هي أخصب حقبة في حياته ،

* Aristotle (384-322 ق . م) اقرأ ترجمته في الفصل الأول .

فقد تابع فيها عدداً من التجارب التي برهنت على عيوب فيزياء أرسطو، مثل الاعتقاد بأن حركة الجسم لا يمكن أن تستمر إلا إذا ظل على تماس مع القوة المسيّرة له، إذ أظهرت دراسات غاليليو في الميكانيك أن الجسم لا يتوقف عندما تزول عنه القوة المسيرة، بل يتباطأ بمعدل يتوقف على مقدار الاحتكاك الذي يلاقيه، وهذه النتيجة هي التي أوصلته مباشرة إلى مفهوم العطالة. وأثبت غاليليو كذلك أنه لو لم يكن هناك احتكاك جوي للأجسام الساقطة لسقطت جميعها بسرعة واحدة. وتروي الأسطورة المتداولة أن غاليليو أسقط عدة أشياء ذات أوزان مختلفة من قمة برج بيزا المائل لكي يثبت خطأ الرأي الذي تشبث به أرسطو وهو أن الجسم الأثقل يصل الأرض أولاً، ولكن ما من وثيقة تثبت أنه أجرى فعلاً تجارب كهذه.



غاليليو غاليليه (1564 - 1642)

ويمكن أن نذكر من اكتشافات غاليليو العلمية: تساوي مدد اهتزازات النواس وميزان توازن السوائل ومبادئ التحريك (الديناميك) وفرجار التقسيم التناسبي وميزان الحرارة[1]. كما قام بعدة تحسينات في تكوين المقراب، وأثبت أنه باحث لا مثيل له في أرصاده لسطح القمر ولأقمار المشتري ولأطوار الزهرة. وكانت دراسته المتأنية الرصينة لتجاعيد سطح القمر هي أولى المناسبات التي دعت غاليليو لأن ينفر من التزمت الديني، فقد رأى من خلال مقرابه ما بدا أنه «بحار مظلمة وأرض

مضاءة وقارات ومحيطات وقمم جبلية تعلو في ضوء المصباح ووديان تنحدر تدريجياً في الظلال ... »[2]. فلم يفت غاليليو أن يرى وجه الشبه الواضح في هذا مع جغرافية الأرض، كما لم يتردد في التفكير بأن الأرض والقمر يتألفان من مادة واحدة، فكانت هذه نتيجة خطرة، لأن الاعتقاد السائد آنذاك هو أن الأرض تحتل مكاناً مركزياً في الكون وأنها لذلك يجب أن تكون من مادة لا توجد في مكان آخر. ثم إن غاليليو كان يفضّل نظام كوبرنيق القائل بمركزية الشمس، وكان يساوره الظن بأن الأرض هي أصغر كوكب في المجموعة الشمسية، لذلك بات مقتنعاً بأن وجهة نظر السلطة الدينية عن الكون خاطئة.

وكان رجال الكنيسة مطلعين على آراء غاليليو، فلم تغب عن بالهم شكوكه فيما يتصل بفلسفة أرسطو، إذ كانت هذه الشكوك تمثل تحدياً لوحدة الكنيسة الفكرية، ولم تكن الكنيسة نفسها تميل إلى أن تتساهل مع وجهات النظر المعارضة، لاسيما أنها كانت تواجه آنذاك تحدي حركة الاصلاح البروتستنتي، وكان كثيرون يظنون في الحقيقة، أن التمادي في حرية الفكر ساهم في الانشقاق، لذلك لم تقدم الكنيسة على التسامح مع أي تحد إضافي لمعتقداتها، وكان غاليليو على علم بهذا الموقف ولم يخفف من حماسه لنظام كوبرنيق سوى اعتقاده بأن دفاعه عن مركزية الشمس سيعرضه للعقاب من قبل المؤسسة الدينية، وهذا ما يتضح من رسالته عام 1597 إلى يوهانس كبلر:

.... كنت لسنوات أؤيد وجهة نظر كوبرنيق التي تفسّر لي أسباب كثير من الظواهر الطبيعية التي ظلت بدون أي تفسير إطلاقاً ضمن حدود الفرضيات الشائعة المسلم بها. ولكي أفنّد هذه الفرضيات الأخيرة جمعت العديد من الاثباتات، ولكني لا أجرؤ على إطلاع الجمهور عليها علناً خوفاً من أن يصبح مصيري كمصير معلمنا كوبرنيق الذي أصبح في رأي عدد لا يحصى من الناس (وهكذا أصبح عدد المجانين) عرضة وهدفاً للضحك والسخرية، على الرغم من أن شهرته في نظر العديدين ستظل خالدة أبد الدهر[3].

وقد تأيدت تحفظات غاليلو بعد ذلك عندما أُحرق جيوردانو برونو Geordano Bruno على السفود (الخازوق) عام 1600 بتهمة الهرطقة. وكان قبل موته في كامبودي فيوري Campodei Fiori قد أمضى ست سنوات في السجن بأمر من سلطات التفتيش التي عاقبته بالسجن والموت لأنه رفض أن يُنكر آراءه الفلسفية التي كانت تقوم على اعتقاده بأن الكون لا نهائي وأن فيه عدداً لا نهاية له من العوالم. وكان قول برونو بأن الكون لا مركز له وأن فيه العديد من العوالم يُعد تحدياً مباشراً لنظرية مركزية الأرض. ولكن دفاع برونو، الذي لم يعرف اللين أبداً، عن هذه الآراء التجديفية وضع حداً لحياته. ومع ذلك فإن ثمة خلافاً بين برونو وغاليلو، وهو أن الأول بنى نظرية كونية تتعارض مباشرة مع صورة العالم التي رسمتها التوراة، في حين لم يكن غاليلو مستعداً لأن يؤوّل نتائج نظرية كوبرنيق بطريقة تخالف المسيحية.

كان (غاليليو) طيلة حياته مقتنعاً بأن فكرة شمس ثابتة وأرض متحركة متناسقة كلياً مع التوراة لو أنها قُرئت بدقة وإمعان. وليس ثمة ما يظهر أن غاليليو كان يوماً يعاني من صراع مع شعوره الديني، بل لقد تبين أنه لم يكن فحسب أول من بدأ عصر العلم الحديث، وإنما كان أيضاً أول ممثل لتلك الفئة من العلماء الذين لم يجدوا صعوبة في التوفيق بين العلم وإمكان التدخل من قبل مؤثرات خارقة عن الطبيعة[4].

فمعتقدات غاليليو الدينية لم تثنه عن إيراد الحجج المؤيدة لنظرية كوبرنيق، ولكن جهوده كلها أخفقت في تجنب اعتراضات الكنيسة ووجِّه إليه اللوم من قبل محكمة التفتيش عام 1616، كما أُمر بعدم التمسك بنظرية مركزية الشمس، وعدم تعليمها أو الدفاع عنها. ولما كان غاليليو رجلاً عملياً أكثر مما كان عليه جيوردانو برونو، فقد رأى أن الاستشهاد على سفود ليس فيه سوى مصلحة شخصية تافهة، لذا وافق على الالتزام بشروط حكم التأنيب. ولم ينشر غاليليو أي شيء حتى عام 1623 عندما تسنم صديقه الكاردينال بربريني Berberini كرسي البابوية باسم أوربان الثالث Urban. وكان غاليليو يعتقد بأن أوربان سيكون نصيراً للفنون والعلوم، غير أن هذا لم يستطع أن ينقض القرار المنافي لمركزية الشمس، ومع ذلك «لم يحرّم مناقشة النظرية على أنها فرضية تأملية»[5]، وعندما نشر غاليليو كتابه «حوار حول النظامين الكونيين الرئيسيين»، عام 1632، دعماً للنظرية المدانة، أهداه لأوربان وقدم للكتاب ببيان مسهب يبدي فيه إخلاصه للكنيسة.

وعلى الرغم من أن غاليليو كان حتى ذلك الحين حريصاً على ألا يعرض نظرية كوبرنيق إلا على أساس أنها بديل محتمل للنظرية المقبولة، فإن تحيزه كان واضحاً فيما ورد في كتابه (حوار). وكان لغاليليو أعداء في المقر البابوي، فخافوا أن يستمر اضمحلال فلسفة أرسطو، لذلك أقنعوا محكمة التفتيش بأن غاليليو لم يلتزم بشروط حكم التأنيب لعام 1616، فلم تجد المحكمة بداً من أن تأمر غاليليو عام 1632 بالقدوم إلى روما لكي يواجه التحقيق. ووصل غاليليو إلى روما في شباط / فبراير عام 1633، وتم استجوابه هناك بعد أربعة أشهر متهماً بأن نشر كتابه (حوار) هو خرق لقرار عام 1616، فثبتت عليه التهمة الموجهة إليه، وحُكم عليه بالسجن. كما أُجبر على الركوع واستنكار اعتقاده بأن الأرض تتحرك حول الشمس. ويقال أن غاليليو تمتم بصوت مهموس عبارته (E pur si muove) أي (ومع ذلك فإنها تتحرك)، مع أنه وعد بألا يتحدى نظرية مركزية الأرض. ولكن سُمح لغاليليو بأن يعود إلى منزله في فلورنسة، حيث ظل خاضعاً للإقامة الجبرية طيلة السنوات الثمانية الأخيرة من حياته، ولم يكن أمامه أي خيار سوى أن يحجم بعد ذلك عن معارضة الجمهور. ومع هذا، فقد تابع تجاربه العلمية طيلة ذلك الوقت، كما تدبر أمره لتهريب نسخة من كتابه (حوار) إلى خارج البلاد، حيث أمكن ترجمته إلى اللغة اللاتينية*.

لقد ساهم غاليليو، كما أشرنا سابقاً، بدور حيوي بالغ الأهمية في إرساء بواكير العلم الأولى

* لأنه نُشر أولاً باللغة الإيطالية.

على أساس وطيد من التجارب والملاحظات بدون أن ينسى في الوقت نفسه تطهير العلم من التأملات الفلسفية التافهة ولا سيما في مجال الميكانيك ، فهذا العلم ، علم الميكانيك ، نشأ من دراسة الحركة التي تطورت على مرحلتين ـــ علم الحركة Kinematics وعلم التحريك Dynamics ـــ أما علم الحركة فهو يدرس حركة الأجسام دون أن يتحرى عن الأسباب الكامنة وراء هذه الحركة ، وأما علم التحريك فهو يدرس القوى بصفتها سبباً في تغيير حالة الجسم الحركية ، وعلى هذا فإن علم الميكانيك لم يتطور تطوراً تاماً إلا عندما نشر نيوتن قوانينه الثلاثة عن الحركة ، التي بدونها ما كان ممكناً للديناميك أن يتطور ، ولكن غاليليو كان قد أسس مسبقاً دراسة الحركة بصفتها علماً

والحقيقة أن دراسة الميكانيك نشأت عن حاجتنا إلى فهم بعض الظواهر العلمية ، مثل تطاير القذائف (كالأسهم ، وطلقات البنادق ، وقنابل المدافع) أو تسيير المركبات أو حركة الحيوانات أو طيران الطيور . وكان ليوناردو دافينيشي قد ركز على دراسة الميكانيك لأنه في نظره أرقى العلوم ، ويمكن تطويعه للصياغة الرياضية والاختبار . ولذلك ليس غريباً أن يشغل غاليليو نفسه ، وهو الذي كان خلف دافينيشي الفكري ، بدراسة الميكانيك أكثر من أي جانب آخر في الفيزياء ، ولكنه كان يشعر بفطرته أنه لا يمكن الهيمنة على دراسة الميكانيك ما لم تُفهم طبيعة الحركة نفسها فهماً شاملاً .

وكان التقدم الذي تحقق منذ أيام أرسطو في دراسة الحركة قليلاً جداً ، فالفكرة التي كان قد أدخلها أرسطو ، والتي تبدو معقولة جداً ، هي أن الجسم لا يمكن أن يتحرك إلا إذا دفع أو سحب بقوة من نوع ما . وهذا القول كان مقبولاً بوجه عام بصفته حقيقة واضحة لأن الناس كانوا يعرفون من تجربتهم مباشرة أن الأشياء لا تتحرك على الأرض إلا إذا دفعت أو سحبت ، وكان الجهد الجسماني ضرورياً لإبقاء الجسم في حالة حركة . ولكن تصور أرسطو هذا أدى إلى إثارة بعض الصعوبات في دراسة حركة الكواكب ، لأنها كانت تبدو متحركة من دون أن يكون ثمة ما يدفعها أو يسحبها . أما المدرسيون Seolastiq واللاهوتيون فقد حلوا هذه المشكلة بأن أوكلوا ، وبكل بساطة ، أمر كل كوكب لملاك يحافظ على حركته في مداره السماوي المخصص له . غير أن ثمة اعتراضاً وُجه إلى هذا التصور هو ، كما أعلن عنه في البدء جماعة القائلين بالدفعة (الأولى) والذين أتوا بعد وليم أوكام ، أن الله كان قد أعطى كل جرم سماوي زخماً جعله يثابر بعد ذلك على حركته . وكانت تلك طريقة سهلة للخروج من المأزق بدون إغضاب الكنيسة ، ولكنها لا تضيف شيئاً إلى فهم الحركة . وهكذا ظل الميكانيك متعثراً طيلة هذا الوقت من دون أن يتقدم إلى أبعد من مرحلة المناقشات ، إلى أن بدأ غاليليو بإخضاعه للاختبارات التجريبية ، وبصياغة نظرية رياضية للحركة .

وكان غاليليو ثاني عالم عظيم بعد يوهانس كبلر يدرك أهمية الرياضيات في تطوير مبادئ الطبيعة وقوانينها ، وبدأ هو نفسه بمهمة تطبيقها في دراسة الظواهر الفيزيائية ، محاولاً بذلك إثبات أن كل ظاهرة فيزيائية مشتملة على خواص قابلة للقياس يمكن أن تصاغ صياغة رياضية ، بل لقد ذهب

إلى أبعد من هذه الفكرة بأن نبه إلى أن صياغة مسألة ما صياغة رياضية يمكن أن تؤدي ، مع استخدام بعض المعالجات الرياضية ، إلى نتائج ما كان من الممكن ملاحظتها مباشرة في الظواهر نفسها . وهذا هو طبعاً أساس معظم الاكتشافات الحالية (كما كانت منذ عهد نيوتن) .

وقد طبق نيوتن مهاراته الرياضية في بادئ الأمر على مسألة التكبير والتصغير في المقاييس ، التي ما تزال تطبق حتى اليوم على نطاق واسع في جميع فروع الهندسة والعلم ، إذ لاحظ أن أبعاد الدعائم (كقوائم الفيل مثلاً) في بناءين متشابهين (أي مكونين من تركيب كيمياوي واحد وكثافة واحدة) لا تتناسب مع مقياس الأبعاد نفسه للبناءين : فمثلاً ، إذا كان حجم (أو ضخامة) البناء الأكبر خمسة أمثال الأصغر ، فإن ثخن دعائم الأكبر يجب أن تكون أكثر من خمسة أمثال مثيلاتها في الأصغر ، والسبب في ذلك هو أن وزن البناء يتزايد مثل تزايد حجمه ، وبالتالي مثل مكعب ارتفاعه (أي أن وزنه يزداد بمقدار 125 مثلاً إذا زاد الارتفاع إلى خمسة أمثاله) . ولكن قوة التحمل ، من جهة أخرى ، تتعلق فقط بمساحة مقطع الدعامة العرضاني ، أي أن قدرة الدعامة على التحمل تزداد مثل مربع الارتفاع (أي 25 مثلاً فقط) . وهذا يعني أن قوة التحمل تنقص خمس مرات عما يلزم فيما لو زدنا أبعاد البناء إلى 5 أمثالها ، لذلك إذا زيدت أبعاد البناء إلى 5 أمثالها ، فإن دعائمه يجب أن تزداد أقطارها (أي ثخنها) بنسبة تساوي على الأقل الجذر التربيعي للعدد 125 .

ولكي يدرس غاليليو حركة سقوط الأجسام الحر (أي الحركة التي لا يعوقها أي نوع من المقاومة) ، رأى أن عليه أن يأخذ في الحسبان مقاومة الهواء التي تعيق السقوط الحر . ولما لم يكن لديه فراغ (خلاء) ليجري فيه تجاربه ، فقد قرر إجراء التجربة على كرات معدنية صغيرة ذات كتل مختلفة . ولما كانت مقاومة الهواء لحركة الجسم تتوقف على مساحة الجسم المواجهة لجريان الهواء ، فإن الكرة تعاني مقاومة أقل مما يعانيه أي جسم آخر ذي شكل مختلف له الكتلة نفسها . وهكذا كان على غاليليو ، بعد قناعته الراسخة بهذا الأمر ، أن يبتكر طريقة ليتابع بالتفصيل حركة سقوط الجسم سقوطاً حراً حالما يسقط ، وهي طبعاً حركة يستحيل متابعتها إذا سقط الجسم شاقولياً ، لأن الأمور تجري عندئذ بسرعة فائقة . لذلك لجأ غاليليو إلى تذليل هذه الصعوبة بأن جعل كرته المعدنية تتدحرج نازلة على مستويات مائلة ملساء جداً .

وما كان غاليليو يسعى إلى اكتشافه هو : كيف يغيِّر جذب الثقالة (الشاقولي دوماً) حركة جسم ساقط ، وهل تتأثر حركات الأجسام كلها بالطريقة نفسها ؟ لذلك ترك أحجاراً ذات أوزان مختلفة تسقط من الارتفاع نفسه ، فبدا له أنها جميعاً تصطدم بالأرض في وقت واحد . غير أن هذه الملاحظة العرضية لم تكن بالنسبة له مقنعة قناعة كافية ، لذلك ابتكر تجربة المستوي المائل لكي يُجري قياسات دقيقة ، إذ إن الكرة لا تتأثر لدى تدحرجها على المستوي المائل بكامل جاذبية الثقالة ، بل تتأثر فقط بجزءٍ منها هو ذاك الذي في اتجاه المستوي المائل أو الموازي له . وكلما ازداد

انحدار المستوي المائل ازداد تأثير جاذبية الثقالة في اتجاه ميله ، فتزداد قيمتها من الصفر (عندما يكون المستوي أفقياً) إلى حدها الأقصى (أي قيمتها كاملة) عندما يكون المستوي شاقولياً . لذلك ، كان باستطاعة غاليليو إذا قلل من انحدار المستوي المائل أن يجعل الكرة تتدحرج على المستوي بالبطء الذي يرغب فيه ــ أو ببطءٍ كافٍ يتيح له القيام بأي قياس يشاء ، وأن يقدر زمن الحركة بدقة وعناية ــ فإذا جعل الانحدار 45° فإنها تهبط إلى نصف جذر العدد 2 التربيعي من قيمتها الكاملة ، وتهبط إلى نصف جذر العدد 3 التربيعي من قيمتها الكاملة إذا جعل الانحدار 60° درجة .

وقد لاحظ غاليليو عدداً من الملاحظات الهامة التي أصبحت بعد ذلك بحسب صياغتها في قوانين نيوتن الثلاثة للحركة أساساً لميكانيك نيوتن . وأول هذه القوانين ــ قانون العطالة ــ كان نتيجة مباشرة لدراسة غاليليه للحركة ؛ إذ لاحظ أن سرعة الكرة في أثناء هبوطها على المستوي المائل تزداد زيادات متساوية في مدد زمنية متساوية ، ولكنها ما أن تترك المستوي المائل وتتحرك على المستوي الأفقي الأملس حتى تظل سرعتها ثابتة ، وبذلك أثبت تجريبياً بطلان فكرة أرسطو القائلة : عندما تؤثر قوة في جسم ، فإن عملها يقتصر على إبقائه متحركاً بسرعة ثابتة ؛ إذ أثبتت تجارب المستوي المائل أن قوة الثقالة الثابتة في اتجاه المستوي المائل تزيد من سرعة الكرة المتدحرجة عليه ، أي أن تأثير القوة يغيِّر من سرعة الجسم (كما هو شأن الحركة وفق المستوي المائل) ، في حين أن غياب القوة (كحالة الحركة في المستوي الأفقي) يعني بقاء السرعة ثابتة . وهكذا قَرَنَ غاليليو التسارع (أي تغير السرعة) بفعل القوة .

وقد استنتج غاليليو من مشاهداته الكرات المتدحرجة عدداً من النتائج الرياضية ، فبين أول ما بين ، أن سرعة الكرة المتدحرجة تزداد باستمرار مع الزمن ، وأن معدل هذه الزيادة في السرعة (التسارع) هو نفسه بالنسبة إلى جميع الكرات بغض النظر عن أوزانها أو حجومها ــ بحيث أن جميع الكرات التي تبدأ من قمة مستو مائل تصل كلها إلى الأسفل بالسرعة نفسها . كما أن غاليليه برهن رياضياً أن المسافة التي تهبطها الكرة على طول المستوي تتناسب مع مربع زمن الهبوط ، وأن مربع سرعة الكرة عند أي نقطة من المستوي المائل تتناسب مع بعد هذه النقطة على طول المستوي عن قمته (أي النقطة التي بدأت منها الكرة حركتها) ، ثم استنتج من هذه العلاقات الرياضية البسيطة أنه إذا سقط أي جسم (بغض النظر عن وزنه) سقوطاً حراً في الفراغ ، فإن سرعته تزداد بما يقرب من 32 قدماً في الثانية كلَّ ثانية (تسارع الثقالة) . كما أشار علاوة على ذلك إلى أن السبب في توقف الكرة على المستوي الأفقي في النهاية يرجع إلى أن هذا المستوي ليس أملس تماماً ، فكلما ازدادت نعومة المستوي وملاسته ، ازدادت المسافة التي تتدحرج الكرة عليه ، واستنتج من ذلك أنه إذا صار المستوي أملس تماماً ظلت الكرة متدحرجة عليه إلى الأبد (مفهوم العطالة) . ثم أضاف ملاحظة هامة أخرى : إن سرعة الكرة عند أسفل نقطة من جميع المستويات المائلة هي نفسها مهما اختلفت أطوال هذه المستويات ، بشرط أن تكون قمة هذه المستويات على ارتفاع واحد عن الأرض ،

أو بعبارة أخرى : إن سرعة الكرة عند أسفل المستوي المائل تتعين بارتفاعه فقط عن الأرض . إن هذه الملاحظات والاستنتاجات ، مهما بدت لنا بسيطة الآن ، هي التي مهدت لبداية علم الميكانيك .

وقد مضى غاليليو إلى أبعد من تجاربه في دحرجة الكرات على المستويات المائلة ، فطبق دساتيره الرياضية عن الحركات على تحليق قذائف من قبيل قذائف المدفعية ــ فكان تطبيقه هذا آنذاك مهماً جداً . وقد برهن أنه إذا أُطلقت قذيفة بأي زاوية كانت مع الأرض ، فإن مسارها يكون قطعاً مكافئاً ، لأن حركتها في أثناء تحليقها مركبة من حركتين : حركة أفقية وحركة شاقولية . ولما كانت السرعة الأفقية للقذيفة ثابتة ، فإن المسافة الأفقية التي تقطعها من نقطة انطلاقها تزداد (متناسبة) مع الزمن في حين تتناقص سرعتها الشاقولية إلى أعلى باستمرار مع الزمن ، ولذلك فإن ارتفاعها عن الأرض يتغير مع مربع الزمن . وهكذا برهن غاليليو ، بعد أن جمع مركبتي حركة القذيفة الأفقية مع الشاقولية ، على أن مسار القذيفة في تحليقها هو قطع مكافىء وأن مدارها يبلغ حده الأعظمي عندما تقذف بزاوية 45° مع الأرض .

ولم يقتصر غاليليو في بحثه العلمي على الميكانيك بل لقد استخدم عقله ، الشديد النشاط والمحب للبحث والتحقيق ، في العديد من المسائل التقنية والعلمية ، وأظهر في كل وجه من أوجه عمله قدرة الرياضيات على التنبؤ إذا ما ضمت إليها المبادىء العلمية الصحيحة . ففي دراسته للحرارة ، طور أول مقياس (محرار) لقياس درجة الحرارة ، كما استفاد من اهتزازات النواس في قياس الزمن ، إذ إنه كان قد نبه إلى أن تواتر النواس (أي عدد اهتزازاته في زمن معين) يتوقف على طول النواس فحسب ، وليس على سعة الهزة ، بتقريب أول جيد : وقد استخدم النواس في معرفة معدل نبض القلب وأشار إلى أهمية مثل هذه القياسات في التشخيص الطبي .

غير أن شهرة غاليليو اليوم تقوم إلى حد بعيد على مقرابه الفلكي الذي غيّر حال الفلك من علم يخطىء مرة ويصيب أخرى إلى نظام رصد وصفي دقيق ، فاقت دقته أضعافاً كثيرة ما كان عليه فلك العين المجردة . ذلك لأن فلك ما قبل المقراب كان يعتمد على أدوات من قبيل ذات الربع والكرة ذات الحلَق ومسطرة زاوية اختلاف المنظر ، وهي الأدوات التي استخدمها تيخو براهه للقيام بأرصاده الرائعة . ولكن ما أن عُرف المقراب الفلكي حتى اختفى الفلك الوصفي القائم على العين المجردة ، واختفت معه أدواته . وكان غاليليو قد قام بأربعة أرصاد هامة بمقرابه أقنعته ، بما لا يقبل أي شك ، أن نظام كوبرنيق هو الصحيح وأن النظام البطليموسي كان خطأ وذلك للأسباب التالية : (1) إن سطح القمر مليء بالحفر والتضاريس وليس منتظماً أبداً ، مما يبطل الفكرة القائلة بأن الأجرام السماوية « كاملة » ، (2) إن أوجه (أطوار) الزهرة وأوجه القمر متشابهة ، مما يثبت أن الزهرة تدور حول الشمس لا حول الأرض ، (3) إن هناك أربعة أقمار (توابع) تدور حول المشتري ، فهي نموذج مصغر يوضح نموذج كوبرنيق للنظام الشمسي ، (4) إن درب التبانة يتألف من العديد من النقاط المضيئة التي فسرها غاليليو تفسيراً صحيحاً بأنها نجوم بعيدة جداً .

نيوتن وفيزياؤه
طبيعة النظرية

«يذكرنا إقليدس بالجليد الصافي، ويعجبنا نيوتن مثلما تعجبنا قمة جبل تناريف*، وحتى أشد الجهود وأسمى انتصارات العقل المجرد، تبدو كأنها تحملنا إلى أرضٍ غير أراضينا، فنتوه في مجاهل الفكر المحض ويصاب تفكير الإنسان ومحاكمته بالجمود والتجريد».

ـ وُلتر باجوت**

ولد السير إسحق نيوتن (1642-1727) يوم عيد الميلاد بعد وفاة والده بثلاثة أشهر. وقد سمي باسم والده، الذي كان معاوناً زراعياً للسيد حنا أيسكوف Hanna Ayscough في وولثورب في مقاطعة لنكولْن شَر Lincolnshire، ومع أن المولود كان هزيلاً عليل الصحة، إلا أنه نجح في أن يظل على قيد الحياة وأن ينشأ قوياً وإن لم يتمتع قط بصحة ممتازة. ولم يعش إسحق طفولة سعيدة، لأن والدته تزوجت قبل أن يبلغ السنتين من عمره من قس بروتستنتي ثري يدعى بَرْنابا سميث، فتركت إسحق في رعاية جدته وانتقلت إلى القرية المجاورة التي كان يعيش فيها زوجها لكي تساعده في تربية أطفاله الثلاثة. وهكذا ظل إسحق منفصلاً عن والدته قرابة تسع سنوات إلى أن توفي زوج أمه عام 1653. وقد أثر غيابها على الأرجح تأثيراً حاداً في نشأة إسحق وفي شخصيته، بل ولا شك أنه كوَّن موقفه من النساء عامة. لذلك لم يكن له معهن شأن يذكر في حياته كلها ولم يتزوج أبداً. وفيما عدا قصة حب عابرة في شبابه كان اهتمامه منصباً بكليته على عمله، وإلى مدى أقل، على

---

* يقع جبل تناريف في جزيرة من جزر الكناري التابعة لإسبانيا والواقعة في الشمال الشرقي لأفريقية، وقمة جبل تناريف تعلو 3710 أمتار وتكسوها الثلوج على الرغم من أنها محاطة بخضرة دائمة، وتعد الجزيرة من أجمل بقاع العالم.

** Walter Bagehot (1826-1877) من رجال الاقتصاد والسياسة والنقد الأدبي في إنكلترا، ومن أشهر كتبه في الاقتصاد «دراسة لتاريخ النظام المصرفي في إنكلترا (1873) ومن كتبه أيضاً «الدستور الإنكليزي 1867».

منتقديه ، إذ « إن الشعور الحاد بعدم الأمان الذي جعل القلق يسيطر عليه لدى نشره أعماله والعنف اللامعقول الذي كان يدافع به عنها ، لازماه طيلة حياته كلها ، بل ويمكن تتبع آثارهما حتى سنواته الأولى »[1] .

وليس في طفولة نيوتن المبكرة ما يدل دلالة واضحة على قدراته العقلية ، فقد كان طفلاً محباً للاستطلاع وتلميذاً متوسطاً في المدرسة الثانوية في غرانتام ، وكان ينفق من الوقت في أحلام اليقظة في قاعة الدرس أكثر مما كان ينفقه في مراجعة الدروس . وكان يفضل البقاء وحيداً مع نفسه أكثر من مصاحبة الآخرين ، ونادراً ما كان يمارس الألعاب والرياضة مع الأولاد الآخرين ، إذ كان مزاجياً متوتر الأعصاب جداً ، ولكنه كان يخلد إلى تفحص أفكاره ، وقد أظهر فعلاً بعض البراعة الميكانيكية « فصنع أدوات آلية من تصميمه مثل طائرة ورقية ومزولة وساعة مائية ، وهلم جرا »[2] .

وبعد موت زوج أمه ، دعته والدته ليدير الملكية الكبيرة التي آلت إليها . فلم تدم هذه المهمة طويلاً ، إذ أثبت نيوتن عند إدارته لهذه المزرعة أنه لا يصلح لذلك إطلاقاً ، وأنه غير قادر على التلاؤم



السير إسحق نيوتن (1642 - 1727)

مع العمال الزراعيين ، فضلاً عن أن اهتمامه بالأمور الزراعية كان ضعيفاً . وكان من محاسن الصدف أن خاله أقنع والدته بضرورة إعادة نيوتن إلى المدرسة في غرانتام لكي يدرس فيها اللاتينية والحساب ، ويهيء نفسه لصعوبات التعليم الجامعي . وكانت نتائج أعمال نيوتن في مواضيع دراسته كافية لقبوله في كلية ترينيتي في كمبردج حيث حصل على شهادة القبول في عام 1661 ، أي عندما بلغ الثامنة عشر من عمره .

وكانت جامعة كمبردج في ذلك الوقت ، مثل غيرها من الجامعات ، لا تزال غارقة في تعاليم أرسطو ومذهبه ، على الرغم من أن انتساب نيوتن إليها جاء بعد أن كان كوبرنيق وكبلر وغاليليه قد أسهموا إسهاماً عظيماً في العلم الحديث . لذلك قلما كان يدور النقاش عن نظام كوبرنيق القائل بمركزية الشمس أو عن ميكانيك غاليليه ، وكان على نيوتن وزملائه في الدراسة أن يتلقوا بدلاً من ذلك دروساً عن أعمال أرسطو وأفلاطون وعن النظرة الشائعة آنذاك وهي أن الأرض مركز الكون ، على الرغم من تزايد اتضاح عدم واقعيتها . غير أن نيوتن كان قد اجتذبته أعمال فلاسفة الفيزياء ، من أمثال رينيه ديكارت R.Deacartes الذي « كان قد بدأ بصياغة مفهوم جديد عن الطبيعة يصورها شيئاً معقداً غير شخصي ، وآلة عاطلة »[3] بل إن تأثير ديكارت في نيوتن كان هائلاً ، لأن ديكارت ، بخلاف أرسطو ، « كان ينظر إلى الواقع الفيزيائي على أنه ليس سوى جسيمات مادية متحركة باستمرار » ، « ويعتقد بأن جميع الظواهر الطبيعية تنشأ عن تأثير هذه الجسيمات بعضاً في بعض تأثيراً آلياً »[3] . هذا فضلاً عن أن نيوتن وقع تحت تأثير الرياضي إسحق بارو Isaak Barrow الذي كان أول من تعرّف ألمعية نيوتن وشجعه على اهتمامه بالرياضيات ، كما لفت انتباهه إلى دراسة البصريات ؛ فعمل نيوتن أثناء سنتيه الأخيرتين في كمبردج على تقوية مهاراته الرياضية ، وظل يتابع في الوقت نفسه دراسة أعمال علماء النهضة وفلاسفتها ، كما بدأ أيضاً بصياغة مفاهيمه التي غدت ، فيما بعد ، أسس إسهاماته المنقطعة النظير في العلم . غير أن الجهود الكبيرة التي بذلها في دراسته الخاصة ، جعلت دراسته الأكاديمية المطالب بها غير متميزة . لذلك : « عندما نال نيوتن شهادة البكالوريوس في نيسان / أبريل عام 1665 » ، مرت أعظم موهبة في تاريخ الجامعة التعليمي ، بدون أن يأبه لها أحد لأن نيوتن « كان قد بحث في الفلسفة الجديدة والرياضيات الحديثة حتى لكأنه صانعها في حين قصر تقدمه في دراسات على مذكراته الجامعية »[3] .

وفي عام 1665 تفشى وباء الطاعون في لندن ، مما دفع نيوتن إلى مغادرة كمبردج والعودة إلى بيته في وولثورب حيث قضى العامين التاليين متأملاً الأفكار التي بدأ اهتمامه بها حين كان في الجامعة عن المكان والزمان والحركة : « ومن المسلّم به أنه كان ، حين عودته إلى كمبردج (عام 1667) ، قد أرسى نهائياً أسس أعماله في المجالات الكبيرة الثلاثة التي اقترن بها اسمه إلى الأبد ، وهي حساب التفاضل والتكامل وطبيعة الضوء الأبيض والتثاقل (حقل الثقالة) الكوني وما يترتب عليه من

أمور »[4] . كما اكتشف أيضاً نظرية ذات الحدين (الحدانية) . بل إنه « أثناء هذه المدة نفسها ، كان قد تفحص عناصر الحركة الدائرية واستنبط من تطبيق تحليله على القمر والكواكب ، علاقة التربيع العكسي التي تقول إن القوة المركزية (الموجهة وفق نصف القطر المتجهي) التي تؤثر في الكوكب ، تتناقص متناسبة عكساً مع بعده عن الشمس ــ أي تلك العلاقة التي غدت بعد ذلك قانوناً حاسماً للتثاقل الكوني »[5] .

ففي هذين العامين الرائعين اللذين قضاهما نيوتن في وولثورب ، أوصل أعمال غاليليه وكبلر إلى استنتاجاتهما المنطقية ، وصاغ القوانين الفيزيائية اللازمة لتفسير ديناميكية كون ميكانيكي . فطغت إنجازاته العلمية على علم القرنين التاليين وعلى فلسفتهما . حتى ليصعب على المرء أن يفهم كيف أمكن لشاب ناشيء في سنه أن ينجز هذه الأعمال الفذة في مدة قصيرة كهذه ، بيد أن مفتاح الإجابة عن ذلك ، كامن في أن ألمعية نيوتن تقوم على قدرته التي لا تجارى على التركيز .

كانت موهبته التي تميز بها هي قدرته على إبقاء المشكلة الفعلية المحضة حية في ذهنه إلى أن تتضح له حقيقتها بلا لبس أو غموض ، ويخيل لي أن تفوقه يرجع إلى أن قوى الحدس والبصيرة لديه لم يوهب بمثل شدتها وجلدها إنسان على الاطلاق . فكل من فكر يوماً ما تفكيراً علمياً محضاً أو فلسفياً يعرف كيف يمكن للمرء أن يبقي مشكلة ما في ذهنه لحظة من الزمن وكيف يستجمع كل قوى التركيز لديه لكي ينفذ إلى حقيقتها ، وكيف أن هذه المشكلة ستتلاشى وتفلت ، وسيجد أن ما هو بصدد تقديره مجرد هباء . وإني لأعتقد أن نيوتن كان قادراً على إبقاء مشكلة ما في ذهنه ساعات ، بل أياماً وأسابيع ، إلى أن تسلم له سرها المكنون ، وأنه كان باستطاعته عندئذ ، وهو الذي كان يتقن الرياضيات إتقاناً فائقاً ، أن يعطيها مظهرها المنطقي اللائق بها قدر ما يشاء لكي تصبح صالحة للعرض ، غير أن تفوقه الحقيقي الخارق كان في حدسه وبصيرته ــ إذ يقول دي مورغان De Morgan « كان موفّقاً جداً في تخميناته » « حتى لقد كان يبدو أنه يعرف أكثر مما يمكن أن يكون قادراً على توفير وسائل برهانه »[6] .

كانت نظرية نيوتن في الثقالة تعتمد على نظريته القائلة « إن معدل سرعة السقوط تتناسب مع شدة قوة التثاقل ، وأن هذه القوة تتناقص تبعاً لمربع المسافة عن مركز الأرض »[7] . إذ قادته مشاهدته سقوط تفاحة من شجرة على الأرض ، عند إقامته في وولثورب ، إلى أن يستنتج أن الأرض تجذب التفاحة باستمرار حتى حين تكون على الأرض . وهذه الفكرة ، بأن الأرض تجذب الأشياء القريبة من سطحها ، لم تكن جديدة ، إلا أن نيوتن كان أول من قال بأن هذه القوة التي تسبب سقوط التفاحة على الأرض ، هي نفسها القوة التي تبقي القمر في مداره حول الأرض ، وتبقي الأرض في مدارها حول الشمس . ولكن ما وضحه قانون التربيع العكسي رياضياً ، هو كيف أن قوى التجاذب بين جسمين تتوقف على كتلتيهما وعلى المسافة بينهما . كما بين هذا القانون أيضاً النتيجة التي توصل إليها نيوتن ، وهي أن قوة التثاقل الأرضي لا تتميز بأي شيء خاص بها ، وإنما يمكن أن نجدها ناشئة عن جميع الأجسام في العالم . ولم يكتف نيوتن بأن وحد ميكانيك كبلر وغاليليو وأكمله بل بيّن أيضاً أن

حركات العالم الديناميكية يمكن أن توصف بعلاقات رياضية أساسية تصلح في أي مكان في هذا الكون. حتى لقد أعطت فائدةُ الرياضيات المؤكدة هذه الفلسفةَ الطبيعية (كما كانت تسمى الفيزياء آنذاك) أساساً نظرياً قائماً بذاته لم يكن لها مثله من قبل قط.

وكان ثاني إنجازات نيوتن العظيمة تجاربه في الضوء والنظرية الجسيمية التي كوّنها عنه. فحين كان في وولثورب قام بتجارب على الموشور، ولاحظ أنه عندما يمر شعاع ضوئي عبر موشور «كان ينكسر، ولكنه يتجزأ إلى أجزاء تنكسر بانحرافات مختلفة، وأن الحزمة التي تسقط على الحاجز ليست مجرد بقعة متسعة من الضوء، وإنما هي شريط ذو ألوان متتابعة مرتبة بحسب ترتيب ألوان قوس قزح المألوفة: الأحمر، فالبرتقالي، فالأصفر، فالأخضر، فالأزرق، فالبنفسجي»[8]. وحين كان يمر الضوء عبر موشور ثانٍ (مقلوب بالنسبة للأول)، كانت الألوان تعود فتتحد لتكوّن حزمة بيضاء، فساقته هذه التجارب إلى استنتاج أن الضوء الأبيض يتكون من جميع ألوان قوس قزح، وأرشده ثبات المركبات اللونية الظاهري للضوء الأبيض إلى تكوين نظرية جسيمية للضوء، إذ «اعتقد أن الأشعة الإفرادية (وهي برأيه جسيمات من قدر معين) تثير عندما تسقط على شبكية العين إحساسات بألوان إفرادية»[9]. ومع أن زملاءه قبلوا بعد ذلك، بوجه عام، نظريته أن الضوء يتألف من جسيمات غاية في الصغر، إلا أن عدداً من المعارضين، مثل كريستيان هوْيغنْز Christian Huygens، كانوا يحاجّون بأن الضوء يتألف من أمواج. غير أن نيوتن كان يرد على ذلك بأن الضوء، لو كان تموجياً، لكان يجب أن ينعطف (ينعرج) عند الظلال، على نحو ما ينعطف الصوت حول الحواف ويصبح مسموعاً. وكان نيوتن على حق في فكرته هذه، ولم يمض سوى سنوات حتى أثبتت تجارب أكثر دقة بأن الضوء ينعطف فعلاً، وأنه لذلك يملك خواص تموجية؛ ولكن النظرية الجسيمية أعيدت لها الحياة مع ذلك، بمعنىً ما، في بداية القرن العشرين حين اقترح ألبرت أينشتاين أن الضوء يتألف من جسيمات منفصلة تدعى اليوم «فوتونات». وعلى كل حال، فإن الحوار في هذا قد لا ينتهي أبداً إلى نتيجة حاسمة، لأن الضوء يُظهر كلا الطبيعتين الجسيمية والتموجية.

وبعد أن أعيد افتتاح كمبردج في عام 1667 انتُخب نيوتن عضواً في كلية ترينيتي، وبعد ذلك بعامين تخلى موجه نيوتن وناصحه اسحق بارو عن مركزه موصياً بأن يكون نيوتن خلفاً له، فبدأ نيوتن بإلقاء محاضرات في البصريات دون أن يكون قد نشر بعد أي شيء عن اكتشافاته، كما تابع تجاربه في الضوء وصنع أول مقراب عاكس. وقد أثار هذا المقراب اهتماماً عظيماً لدى الجمعية الملكية أدى إلى انتخاب نيوتن عضواً في هذه الهيئة عام 1672. فشجع هذا الشرف نيوتن على تقديم نشرة علمية في البصريات لاقت هجوماً قاسياً من روبرت هوك Robert Hook «الذي كان آنذاك رئيساً للجمعية الملكية ويعد نفسه خبيراً في البصريات» وقد أثارت طريقتة المتعالية في مراجعة النشرة غضب نيوتن الذي كان لا يستطيع تقبل أي نقد لعمله أو أي جدل مقيت. «ولم يمض عام كامل

على تقديم نيوتن لنشرته ، حتى ضاق ذرعاً بتبادل الآراء في المناقشات ، وأصابه من الضجر ما جعله يقطع صِلَاته ويعيش في عزلة فعلية » .

أما خلافات نيوتن مع هوك وهويْغنز في طبيعة الضوء فقد طغا عليها جدل دار حول اكتشاف حساب التفاضل والتكامل الذي بدأ في عام 1684 عندما نشر غ . و . ليبنتز W.Von.Leibnitz بحثه عن هذا الموضوع ، وكان تأخر نيوتن في نشر بحثه عن هذا الحساب حتى عام 1704 هو السبب في اختلاط الأمر حول من له الحق في هذا الاكتشاف ، حتى إلى ما بعد ذلك التاريخ . وكان كل من الرجلين يبدي صداقته للآخر أمام الجمهور ، ولكنه كان في الوقت نفسه يشجع مؤيديه على أن يستخفوا بعمل الآخر . ومن المرجح أن ليبنتز كان قد توصل إلى هذا الحساب بمعزل عن نيوتن ، غير أنه من الثابت حالياً أن نيوتن كان قد بدأ بتطوير حساب التفاضل والتكامل حتى قبل أن يبدأ ليبنتز بدراسة الرياضيات . ولكن النزاع بدأ يُطرح على الصعيد القومي بين أناس لم يكونوا يعرفون أي شيء عن عمل كلٍ من العالمين ، ومع ذلك كانوا يجادلون بانفعال حول صاحب هذا الاكتشاف ، أهو إنكليزي أم ألماني . ولم تنته هذه المشكلة إلى حل طيلة حياة نيوتن ، ففي حين كان كثيرون من زملائه راغبين في تبرئته من تهمة الادعاء بسبب عدم توفر أي دليل (نظراً لشهرته العلمية الواسعة) ، كان معظم علماء القارة الأوربية (دون الجزر البريطانية) ورياضيوها يستخدمون رموز ليبنتز ومصطلحاته ، واستمر استخدامها إلى الآن ، لأنها أكثر ملاءمة .

ولقد حقق نيوتن أهم اكتشافاته في الضوء والرياضيات في أواسط الثمانينيات من القرن السابع عشر ، ولكنه فيما عدا نشرات قليلة عن البصريات لم ينشر إلا القليل من أعماله ولا سيما قانونه في الثقالة . حتى أن علاقاته المتوترة مع العديد من معاصريه في الجمعية الملكية ، كانت تجعله بين حَين وآخر يشمئز من العلم ، ويتوجه باهتمامه إلى مواضيع أخرى كانت تحيره دائماً ، كالدين والتأملات الصوفية ؛ بل إن أهم عمل له ، المبادئ Principia كان من الممكن ألا يُكتب بتاتاً ، لولا دعوى خصمه القديم روبرت هوك بأن من الممكن تفسير حركات الكواكب بقانون التربيع العكسي للجاذبية ، مع أن هوك كان غير قادر على إثبات نظريته ، فما كان من إدموند هالي Edmond Halley ، صديق نيوتن إلا أن طرح المسألة على نيوتن وسأله كيف يجب أن تتحرك الكواكب إذا كانت قوة التجاذب بينها وبين الشمس تتناقص متناسبة عكساً مع مربع أبعادها عن الشمس فأجاب نيوتن بأن الكواكب يجب أن تسير في مدارات إهليلجية (قطوع ناقصة) . وحين سأله هالي بعدئذ ، لماذا تعتقد بأنها تتحرك على هذا النحو ، أجاب بأنه حسب مداراتها . « وهكذا ، كان طلب هالي من نيوتن أن يبرهن نظريته سبباً في أن يبدأ نيوتن بتأليف كتاب يشرح فيه نظريته عن الجاذبية (الثقالة) ويشرح كذلك قوانين الحركة الثلاثة التي صاغها » . وقد أنجز نيوتن كتابه المخطوط في 18 شهراً ، ثم نشره على نفقة هالي بعنوان (المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية) . ومع أن هذا الكتاب كان قد كتب على شكل سلسلة من البديهيات والبراهين المصاغة بكلمات مكثفة

جداً، إلا أنه يظل أعظم ما كتب من الأعمال العلمية وأشدها تأثيراً على الاطلاق . فلقد أعطى صورة كون فرغَ الإله من خلقه وتركه يجري وحده (دونما عون جديد) وفقاً لجميع الحركات الديناميكية التي تخضع لقانون الجاذبية . واكتسب نيوتن بفضل كتابه المبادئ شهرة عالمية، وضمن به مكانة مرموقة لا مثيل لها في المجتمع العلمي : «لقد كان النظام النيوتني قائماً على مجموعة من الافتراضات القليلة والبسيطة المطورة وفق تفكير رياضي واضح وجذاب يكاد يصعب على المحافظين (الحذرين من التجديد) أن يكون لديهم العزم والجرأة لمحاربته »[10] .

ولكن نيوتن، الذي أصبح رمزاً حياً لعصر العقل، سرعان ما ضل عن طريق العلم، وبدأ يبذل جهوداً جهيدة لا طائل منها، لكي يثبت كيف يمكن أن تتحول المعادن الخسيسة إلى ذهب، وراح يكتب عن الكيمياء أسفاراً مطولة لم تكن لها، مع ذلك، أي قيمة أو نفع على الاطلاق . وقد كتب نيوتن أيضاً، بوصفه موحداً مؤمناً احتفظ بمعتقداته الدينية لنفسه وكتمها كي يضمن بقاءه في عمله في كمبردج، أكثر من مليون كلمة يبدي فيها تأملاته عن معاني آيات الكتاب المقدس الخفية، وبيّن أن عمر الأرض نحو 5000 سنة، اعتماداً على عدد الأجيال المذكورة في التوراة .

وقد عانى نيوتن عام 1692 من انهيار عصبي ربما كان ناشئاً عن الاجهاد ليس إلا، ولكنه أجبره على ترك العمل ما يقرب من عامين على الرغم من أنه شفي من المرض تماماً . ومع ذلك، فقد توج بحوثه العلمية بخاتمة بارزة، إذ أمضى بعض الوقت خلال العقدين التاليين وهو يجمع أدلة وقرائن عن نظريته في الضوء التي نشرت قبل أن تظهر بالعنوان المشهور البصريات **Opticks** عام 1704 بعقدين. وكان السبب في تأخر نشر الكتاب، هو أن نيوتن كان يرفض نشره قبل وفاة هوك عام 1703 . وفي هذا العام انتخب نيوتن رئيساً للجمعية الملكية (خلفاً لهوك) وقد ظل يشغل هذا المنصب حتى وفاته . كما انتخب أيضاً عضواً في البرلمان عام 1689، ولكنه لم يطلب الكلام طيلة السنوات العدة التي قضاها في عضويته إلا مرة واحدة عندما طلب إغلاق نافذة كانت مفتوحة .

وفي عام 1696، عُين نيوتن مراقباً لدار سك النقود، وبعد ذلك بثلاث سنوات تسلم منصب الرئيس الأعلى للدار . ومع أن نيوتن ظل محافظاً على انتسابه المهني إلى الجامعة حتى عام 1701، إلا أن تعيينه في الدار أنهى عملياً مهامه الأكاديمية نظراً لانتقاله إلى لندن لتسلم واجباته الرسمية . ولقد حاول بعض المعلقين أن يثبتوا أن هذا التغيير في عمل نيوتن حرم العالم العلمي أكبر شخصياته شموخاً لمدة تقرب من ربع قرن من حياته، ولكن نيوتن نفسه، كما يبدو، كان لديه الاستعداد لأن يعيش خارج الجامعة، كما كان راغباً في أن يتمتع بشهرته في دوامة لندن الاجتماعية . ثم إن هذا التعيين لم يكن مجرد شرف رمزي، لأن نيوتن بذل مجهوداً كبيراً لإنجاز مشروع السك الذي أعده اللورد هاليفاكس . وقد رُفع نيوتن أيضاً إلى رتبة فارس من قبل الملكة آن في عام 1705، وكان هذا شرفاً لم يُمنحه عالم من قبل قط، كما تلقى دخلاً ثابتاً من وجيه زائر، وأشرف على نشر كتابه

البصريات Opticks وطبعتين متتاليتين لكتابه المبادئ Principia . ولقد أمضى السنوات الأخيرة من حياته وهو ينعم بتزلف الجماهير إليه والتقرب منه وقد استمر ذلك حتى وفاته ، وكان له من العمر 84 عاماً . « وعندما توفي في عام 1727 مُنح الشرف الأعظم بأن سُجي جثمانه في نعش مكشوف في قاعة القدس . وقد حمل نعشه اللورد قاضي القضاة ، واثنان بلقب دوق ، وثلاثة بلقب إيرل ، وكان هذا يعني شيئاً ذا شأن في تلك الأيام ــ ثم إن المكان الذي خُصص لنصبه التذكاري كان قد مُنع سابقاً عن أعظم أشرافنا . لقد كانت فرصة عظيمة ــ فهي أول وآخر مرة يمنح فيها رجل من رجال العلم شرفاً قومياً كهذا ، بل إني اعتقد أن هذا الشرف لم يُمنحه أحد في عالم الفكر أو التعليم أو الفن في إنكلترا »[12] .

لقد خلف نيوتن للعلم الحديث إرثاً لم يضارعه سوى عمل ألبرت أينشتاين . بل إن هناك من يحاول أن يثبت أن أفكار نيوتن كانت في زمانها أكثر ثورية مما هي عليه أفكار أينشتاين في أيام حياته . على أن الأمر المهم هو أن كلا الرجلين حقق أعماله العلمية الأساسية وهو في العشرينيات من عمره ، بل وفي مدة قصيرة نسبياً . ولا بد لكي يتضح بوجه الاجمال كيف غير عمل نيوتن العلم الحديث وكيف بدل مفاهيمه عن المكان والزمان والحركة ، علينا أن نبدأ عندما عاد نيوتن ، وهو طالب في كامبردج ، إلى منزله في وولثورب ، حيث توصل إلى سلسلة من الاكتشافات في الرياضيات والفيزياء ، التي أصبحت بعد ذلك أساس الفيزياء الحديثة . فهو يقول في ختام روايته لقصة اكتشافاته المتنوعة التي تضمنت حساب التفاضل والتكامل وقانون الثقالة ونظريته الجسيمية في الضوء ، « كان ذلك كله في عام 1665 و1666 لأني في هاتين السنتين كنت في أزهى أيام العمر التي لم أعش مثلها أبداً إلهاماً وحدساً وميلاً للرياضيات والفلسفة »[13] . على أن نيوتن لم يناقش قوانين الحركة في عرضه هذا لإنجازاته المبكرة ، ولكن يتضح من مناقشته تأثير الثقالة الأرضية في القمر ، أنه فهم حتماً هذه القوانين فهماً كاملاً ، وأنه صاغها في هذا الوقت المبكر .

وكان غاليليو فعلاً قد أرسى سابقاً أساس الميكانيك لدى دراسته للحركة ، كما شدّد على أهمية التسارع ، إلا أن نيوتن هو الذي كان عليه أن ينص على قوانين الحركة الثلاثة ليُشيد عليها علم الميكانيك بصفته علماً واضحاً دقيقاً . فساهمت هذه القوانين في شهرة نيوتن مثلما ساهم فيها قانون الثقالة . ولا حاجة للمغالاة في التأكيد على أهمية هذه القوانين فقد رفعت الميكانيك من علم شبه اختباري حسي وشبه رياضي ، إلى فرع رياضي كامل دقيق دقة الهندسة . ولكن ، قبل أن نبدأ بتحليل هذه القوانين وإظهار قدرتها الاستباقية (التنبؤية) العظيمة ، علينا أن نعرِّف العبارة : « قانون طبيعي » .

إن العلم ليس مجرد تجميع لمعلومات مشاهدة ، ولو كان كذلك ، دونما محاولة لتنظيم هذه المعلومات في بنية عقلية ذات مدلول ترتبط فيها الأجزاء المنفصلة بعضها مع بعض بطريقة محددة

واضحة، لما استهوى هذا العلم عقلنا المحب للمعرفة والاستقصاء. بل إن العلم يتضمن أيضاً ما يدفع إلى اكتشاف العلاقات السببية بين الجزيئات الفردية في المعلومات التي نطلع عليها باستمرار، في أثناء مشاهدتنا العالم المحيط بنا، لذلك لا يمكن أن يكون العلم أبداً مجرد تجميع عشوائي للمعلومات. إننا نتعرض باستمرار لسيل من المعلومات الذي يجري ماراً بمعظم الناس من دون أن يثير فضولهم أو رغبتهم في معرفة معنى هذه المعلومات أو كيف يمكن أن تُفهم بدلالة علاقات أساسية متبادلة تتحكم بجميع الظواهر. إن العلماء هم ممن يثير هذا السيل من المعلومات، والفيزيائيون منهم هم الذين يبحثون عن تفسير لها أو إيجاد القوانين الطبيعية الأساسية ــ كما سندعوها ــ أي أنهم يسعون إلى توجيه جريان هذا السيل.

ولكي نكون أكثر دقة في حديثنا عن طبيعة قانونٍ ما، علينا أولاً أن نعرّف الحادث الذي يمكننا أن نقبل به على أنه أبسط ظاهرة يمكن أن تحدث. ويتطلب هذا منا أولاً إدخال المفهوم المثالي المجرد وهو «الجسيم النقطي» (الذي هو جزء صغير من المادة له ماهيتها ــ التي ستعرف فيما بعد ــ ولكن لا أبعاد له). والجسيم النقطي، كما هو واضح، لا يمكن أن يكون له وجود فعلي، ولكنه يفيدنا في متابعتنا الفكرية لفهم طبيعة الحادث الذي نستطيع أن نعرفه الآن على أنه انطباق جسم نقطي على نقطة معينة من الفضاء في زمن معين ــ وهنا نلاحظ أيضاً أننا أدخلنا مفاهيم غير معرَّفة تعريفاً جيداً ــ مثل «نقطة من الفضاء» و«في زمن معين» ــ ولكننا لن نسبر معانيها إلى أبعد من ذلك في هذه المرحلة من قصتنا.

ثم إن المفاهيم التي تدخل في قوانين الفيزياء ــ كما سنرى ــ ليست كلها معرَّفة، ولكن الفيزيائي يُدخل، عند صياغته للقوانين الطبيعية، أقل عدد ممكن من المفاهيم غير المعرَّفة، فيبني قانونه على هذه اللامعرَّفات بصفتها قاعدة للبناء. ولكن الفيزيائي، على كل حال، لا يستخدم هذه المفاهيم ولا يتعامل معها، على الرغم من أنها غير معرفة إلا إذا استطاع أن يجد طريقة عملية لقياسها، بحيث يحل القياس محل التعريف.

والآن، لنعد بعد أن أدركنا هذا، إلى العلاقة بين «الحادث» و«القانون» ولننظر في سلسلة من الحوادث التي اقترنت بجسيم معين: إن هذا الجسيم سيحدّد دائماً سلسلة من الحوادث على مر الزمن، حتى وإن ظل ثابتاً بالنسبة لنا بصفتنا مراقبين وواضعي قوانين، ذلك لأن باستطاعتنا أن ننسب إليه سلسلة من الأزمنة المختلفة التي ينطبق فيها على نقطة ثابتة من الفضاء، غير أن هذه الحالة الخاصة من «سلسلة الحوادث» لا تفيد في اكتشاف أي قانون، لذلك دعونا نفرض أن الجسيم يتحرك من نقطة إلى أخرى، ولنصل جميع هذه النقاط (أو الحوادث) بمنحنٍ من نوع ما. نسميه «مدار» الجسيم أو «مساره». ويمكن إذن تعريف القانون، بأنه تعبير عام نستطيع أن نحدّد به مسار جسيم كهذا في جميع الظروف. لنأخذ مثالاً بسيطاً على ذلك، مسار جسيم أُطلق في الهواء:

إن القانون الذي اكتشفه نيوتن والذي نستطيع آن نحسب به مسار هذا الجسم المقذوف، يتضمن ـــ كما سنرى ـــ السمات الأساسية لمثل هذه القوانين كلها. ومما يجدر ذكره هنا أن تعيين مسارات الجسيمات أو اكتشافها كان وما يزال الهدف الرئيسي للفيزيائيين، لأن معرفة مسارات الجسيمات تجعلنا ننفذ ببصيرتنا إلى أعماق طبيعة البنى الموجودة في الكون كلها من نوى الذرات حتى المجرات ويتيح لنا اختبار صحة القوانين التي نبحث عنها.

وقبل أن نناقش العناصر الأساسية التي تكوّن قانوناً ما، دعونا ننظر نظرة خاطفة كيف يستخدم الفيزيائي، أو العالم بوجه عام، سحره في اكتشاف القوانين ضمن ما يبدو غالباً أشبه بمجموعة من الحوادث التي تسود فيها الفوضى. وتتألف هذه العملية من وجهين متكاملين، لا جدوى في أي واحد منهما وحده، بل لا بد من اجتماع الاثنين لكي يكونا أعظم أداة فعالة ابتكرها الإنسان كي يسبر غور الكون ويكتشف طبيعته.

وأول هذين الوجهين الذي يدعى «الفيزياء التجريبية» أو «فيزياء المشاهدة» يؤديه الفيزيائي في مختبره. وهو يقوم على تجميع المعلومات التي تؤخذ بصورة قياسات مرتبطة بحوادث بسيطة ومن أنواع مختلفة. فبعض هذه الحوادث، تظهر بوجه عام، بشكل خطوط على ألواح تصوير (فوتوغرافية)، أو أنها تشغِّل أدوات يمكن أن تعطي قراءات عددية من أنواع مختلفة. فدور المجرب، في جميع الأحوال، هو الحصول على معلومات أو بيانات عددية عن حوادث مشاهدة. وأما الوجه الثاني الذي يدعى «الفيزياء النظرية»، فإن الفيزيائي النظري يؤديه «بالورقة والقلم». والغرض الرئيسي من كل هذا النشاط هو اكتشاف القوانين التي تفسّر ما ظهر من حوادث في التجارب التي أجراها المجرب في مختبره.

ومن أهم سمات هذا النشاط المزدوج (المتلاحق) الذي يقوم به المجرب والنظري، أن وجهيه مرتبطان ارتباطاً وثيقاً، فلا المجرب يستغني عن توجيهات النظري لتصميم تجاربه، ولا النظري يستغني عن بيانات المجرب لاختبار صحة نظريته. فإذا تذكرنا دائماً هذا التمييز بين المجرب والنظري أمكننا القول بأن نيوتن كان أول الفيزيائيين النظريين ومن أعظمهم، مع أنه أنجز أيضاً عملاً تجريبياً متميزاً. وفي أية حال، يعالج المجرب والنظري كلاهما حوادث تجري في الطبيعة، فالأول يصف هذه الحوادث والثاني يصوغ القوانين، أي يجد العلاقات بين مقادير مقيسة تربط بين حوادث أو تتنبأ بها. ولما كان الحادث في أبسط صوره، هو (كما أسلفنا) انطباق جسيم على نقطة معينة من الفضاء في زمن معين فإن العناصر الفيزيائية الأولية التي تستخدم في وصف المجرب وفي قانون النظري هي المكان والزمان. لذلك علينا أن نقبل بهذين العنصرين على أنهما العنصران الأوليان غير المعرَّفين اللذين يُبنى عليهما وصف المجرب وقانون النظري.

دعونا أولاً، بعدما سلمنا بهذه الفكرة، ننظر كيف تم إدخال مفهوم المكان، ثم ننتقل بعدئذ

إلى مفهوم الزمان . إن ما يلفت النظر في المكان أمران في وقت واحد : امتداد المكان الذي يرتبط بالمسافات بين الحوادث ، ثم الاتجاهات في المكان وهي ترتبط باتجاهات الحوادث بدءاً من نقطة إرجاع (إسناد) معينة . ولما كنا غير قادرين على تعريف المكان بدلالة كيانات أبسط منه فإننا نقبل به على أنه أحد العناصر الأساسية غير المعرفة ، ثم ننتقل إلى وصف طريقة قياسه . إن هذا القياس ، الذي يحل محل التعريف ، هو ما نعنيه عندما نتحدث عن المسافة بين حادثين ، وتقوم عملية القياس على استخدام وحدة للأطوال (مثل السنتيمتر أو القدم أو الميل أو الكيلومتر) ووضعها على طول الخط المستقيم الواصل بين الحادثين . والأمر الهام في هذه العملية هو اشتراط استقامة الخط ، إذ لا يكون لها معنى إلا إذا عُرفت هندسة المكان . ولما كانت الهندسة الوحيدة المعروفة في أيام نيوتن هي الهندسة الإقليدية ، فإننا نتابع في الوقت الراهن افتراض أن المكان إقليدي أو منبسط وأن الخط المستقيم الواصل بين حادثين هو ببساطة أقصر مسافة بين الحادثين بالمعنى المألوف لهذه الجملة . ونعني بالهندسة الإقليدية ، مجموعة البديهيات الإقليدية الأساسية ومعها كل النظريات الهندسية التي يمكن استنتاجها من هذه البديهيات ، ونخص بالذكر منها هنا تلك التي تسمى بديهية المتوازيات التي تنص على أنه إذا كان ثمة خط مستقيم ونقطة خارجة عنه ، فإنه لا يمكن إنشاء سوى مستقيم واحد يمر بهذه النقطة ويوازي المستقيم المفروض . ويمكن أن يُستنتج من هذه البديهية بسهولة أن مجموع زوايا المثلث $180°$ درجة وأن محيط الدائرة يساوي π مرة من قطرها . غير أنه يتبين للمرء مما سبق ، بالسهولة نفسها ، أنه لا يستطيع أبداً أن يبرهن بطريقة قياس زوايا مثلثات أو محيطات دوائر ، أن هندسة إقليدس تصف فضاءنا وصفاً صحيحاً . وهذا أمر سنعود إليه عندما ننظر في أنواع الهندسة التي يمكن أن تسيطر في الفضاء فيما لو استُبعدت بديهية المتوازيات لإقليدس ، إلا أننا نقبل حالياً هندسة إقليدس ونتصور أن جميع الحوادث في كوننا (الكون النيوتني ، في دراستنا الآن) يرتبط بعضها ببعض بخطوط مستقيمة يمكن أن ننسب إلى كلٍ منها عدداً معيناً (هو قياس طوله) .

على أن هذا التنظيم الهندسي لعددٍ كبير من الحوادث ، ليس له معنى إلا في لحظة خاصة (أو صورة آنية) لا شيء يتحرك أثناءها . ولكن المسافات بينها كلها تتغير فعلاً ، من لحظة إلى أخرى . وبما أن هذه المسافات تراوح في أي لحظة من المسافات الممعنة في الصغر (كالمسافات الفاصلة مثلاً بين النترونات والبروتونات في نواة ذرية) إلى المسافات الفلكية (كالمسافات بين المجرات) ؛ فللمرء إذاً أن يتساءل : هل يعقل أن يكون لهذه المسافات كلها معنى هندسي واحد مع كل هذا التباين الهائل بينها؟. إنه فعلاً سؤال مهم ومشروع ، لأن عملية استخدام وحدة القياس مباشرة للحصول على المسافة ، ليست قابلة للتطبيق إلا في حالة المسافات التي في متناولنا ، ولكنها لا تطبق على المسافات النووية أو الذرية أو الكونية الفلكية ؛ لذلك لا بد للحصول على هذه المسافات من اتباع طريقة غير مباشرة ، وسوف نعالج هذه النقطة بالتفصيل فيما بعد ، ولكننا نكتفي هنا بمناقشة موجزة لعملية قياس المسافات الذرية والفلكية ، كي نظهر المشاكل التي تنشأ عن

تسميتنا لهذه الأنواع المختلفة كلها من العمليات بالاسم «قياسَ» مسافات.

وللحصول على المسافات الذرية نلجأ إلى سبر المادة باستعمال جسيمات ذرية أو دون الذرية (إلكترونات أو بروتونات أو نترونات) تكون عالية السرعة، أو باستعمال إشعاعات عالية الطاقة (أشعة سينية أو أشعة غاما)، ثم نلاحظ كيف تتبعثر الجسيمات حين تتفاعل مع الذرات أو مع النوى. فإذا استخدمنا قوانين التفاعلات المسلّم بها فيما بين الجسيمات الذرية ودون الذرية، فإننا نتعرف هندسة الذرات، ونتعرف بالتالي أبعادها. إن هذه العملية هي أشبه ما تكون بعملية مقارنة بين أبعاد الجسيمات السابرة وأبعاد الذرات أو النوى التي أريد سبرها، ونحن نفعل الشيء نفسه أساساً عندما نسبر بنية مادية بالإشعاع، إذ نستخدم عندئذ طول موجة الإشعاع (أي المسافة بين قمتين متتاليتين من موجة الإشعاع) على أنه هو وحده الطول، ونتصور الموجة كأنها وضعت على امتداد أبعاد البنية التي نريد سبرها.

أما المسافات الفلكية، فنقيسها بطريقة مباشرة تقريباً بأن نلاحظ التغير الظاهري في وضع النجم المعني عندما تتحرك الأرض مثلاً، من أحد طرفي مدارها إلى الطرف الآخر في أثناء دورانها حول الشمس (وهذه هي طريقة اختلاف المنظر). غير أن هذه الطريقة لا يمكن تطبيقها إلا على النجوم القريبة (ضمن حد لا يتجاوز بضع مئات من السنوات الضوئية) وأما الأجرام السماوية البعيدة جداً، فيمكن الحصول على أبعادها باستخدام طرائق غير مباشرة تعتمد على تألقها الظاهري. وهكذا يتضح من هذه الدراسة المختصرة لقياس المسافات الذرية والفلكية مدى البون الشاسع بين تقنياتها وبين العملية البسيطة القائمة على استخدام وحدة القياس على امتداد الخط والتي هي أساس عملية قياس المسافات.

ومن الواضح جداً أن قياس بعد حادثٍ ما عنا لا يكفي وحده لوصف معالمه المكانية، بل لا بعد من تحديد اتجاهه أيضاً، لذلك لا بد لنا عندما ننظر في تشكيلات الحوادث الفضائية، من أن نأخذ في الحسبان جانب الاتجاه، مثلما أخذنا جانب الامتداد. ذلك لأن المكان متعدد الأبعاد، فهو في الواقع وكما نعلم، ثلاثي الأبعاد. فيا تُرى ما الذي يعنيه هذا القول بالتحديد وكيف نعين أبعاد المكان؟.

وللإجابة عن هذا التساؤل، نبدأ بتعيين اتجاه خاص هو مستقيم نتخيله ممتداً من عندنا إلى نجمٍ ما، ثم نرسم مستقيماً آخر يمر بموضعنا ويصنع زاوية قائمة مع المستقيم الأول. وهنا نلاحظ أن هذين المستقيمين يعينان (أو يمتد فوقهما) مستو. إن أي مستقيم آخر (أو اتجاه) مرسوم في هذا المستوي يمكن أن يعبَّر عنه بأنه واقع جزئياً على اتجاه المستقيم الأول (أي المستقيم المتجه إلى النجم)، ويقع بجزئه الآخرِ على اتجاه المستقيم الثاني، لذلك نقول عن أي مستوٍ في الفضاء أنه ثنائي الأبعاد، أو أنه يحوي اتجاهين مستقلين فقط، أو بعبارة أخرى: إذا كان لدينا مستقيم في المستوي ونقطة

عليه ، فإنه لا يوجد سوى مستقيم واحد يمكن رسمه في المستوي ماراً بهذه النقطة ومتعامداً مع المستقيم الأول . ولكن ما زلنا نستطيع أن نرسم مستقيماً ثالثاً عمودياً على هذا المستوي ، فيكون بالتالي عمودياً على المستقيمين الأوليين ، فهذا المستقيم الثالث يحدد اتجاهاً ثالثاً مستقلاً (عن الاتجاهين السابقين) في الفضاء . وهكذا فإن الفضاء ثلاثي الأبعاد ، لأن أي مستقيم آخر مرسوم في الفضاء يمكن أن نتصوره واقعاً جزئياً على اتجاه كلٍ من المستقيمات الثلاثة المتعامدة مثنى مثنى .

إن تعددية أبعاد المكان تدفعنا لأن نفرّق بين مجموعة من الكيانات الفيزيائية الأساسية التي تتعين كلياً بمقاديرها بدون أن يكون لها أي صفة مكانية (أو ليس لها سمات الاتجاه الفضائي) ، منها مثلاً الزمن والكتلة ودرجة الحرارة ، وبين مجموعة أخرى من الكيانات ، التي هي من قبيل الانزياحات ، لها سمات الاتجاه إضافة إلى سمة المقدار . لذلك نقول عن كيانات المجموعة الأولى إنها « سلمية » ، وعن كيانات المجموعة الثانية إنها « متجهات » . فالسلمي يكتمل وصفه بمقداره ، في حين لا يكتمل وصف « المتجه » إلا باتجاهه ومقداره معاً .

ولقد بحثنا عند دراستنا السابقة لمفهوم المسافة بين حادثين ، في مقدار هذه المسافة ولم نبحث في الاتجاهات ، ولكن ذكرنا منذ قليل أن وصف حادث ما ، لا يكتمل إلا بإعطاء الصفتين معاً : اتجاهه وبعده عنا . فأما بعده ، فقد رأينا أيضاً منذ قليل أنه يمكن قياسه بأن نتحرك نحو الحادث على طول خط مستقيم وأن نعد عدد وحدات الطول التي تحويها المسافة إلى الحادث ، من وحدة الطول . ولكن كيف نقيس الاتجاه ؟ هنا ندخل مفهوم الزاوية ، فهي قياس مقدار دوراننا عندما نغيّر وجهتنا من اتجاه إلى آخر .

ولإعطاء صورة أوضح وأدق عن ذلك ، دعونا نختر اتجاهاً في الفضاء (وليكن مثلاً خطاً تخيلياً يمتد ، كما سبق وصفه ، من عندنا إلى نجم معين) . ثم لنبدأ بالدوران (دون أن نتحرك مع ذلك من موضعنا) منحرفين عن هذا الاتجاه . إن الاتجاه الذي نواجهه ، يتغير حالما ندور . وإذا تابعنا الدوران إلى أن نواجه الاتجاه الأول ، فإننا نقول أننا قمنا بدورة كاملة ، ونخصص للدورة الكاملة 360 وحدة دوران ، تدعى كل وحدة منها درجة واحدة . إن الزاوية المشكلة من مستقيمين متقاطعين متجهين في اتجاهين مختلفين ، هي قياس مقدار الدوران الذي يجب أن نقوم به لكي نحول خط نظرنا من أحد المستقيمين إلى الآخر . فكما أن المسافة تعطي عدد الخطوات التي يجب أن نخطوها من نقطة من الفضاء إلى نقطة أخرى فكذلك الزاوية ، هي المقدار الذي يجب أن ندوره لكي نغيّر وجهتنا من اتجاه إلى آخر . فالمسافة مقدار والزاوية تعين الاتجاه ، فلكي نعين أي متجه تعييناً كاملاً يجب أن تدخل الزاوية في هذا التعيين .

ويمكن أن نعبّر عن الزاوية بأي وحدة نشاء مثلما يمكن أن تعين المسافة (بالميل مثلاً أو بالسنتيمتر أو بالقدم) ، وهكذا نقسم الدرجة إلى 60 قسماً متساوياً (يسمى كل منها دقيقة)

ونقسم الدقيقة أيضاً إلى 60 قسماً متساوياً يسمى كل منها ثانية . ولكن ، ثمة وحدة أخرى مهمة للزوايا يستعملها الفيزيائيون والفلكيون والرياضيون وتدعى « راديان » . وقد يكون فهمها أوضح إذا تصورتم أنفسكم واقفين في مركز دائرة وأن جسيماً يتحرك على محيطها ، وأنكم تتابعون الجسيم بنظركم إلى أن يقطع على طول المحيط ، بدءاً من اللحظة التي بدأتم فيها متابعة حركته ، مسافة تساوي نصف قطر الدائرة ، فمقدار الدوران الذي قمتم به ، أي الزاوية التي درتموها ، يعرّف بأنه يساوي رادياناً واحداً . وعلى هذا فإن الدورة الكاملة ، أي 360 درجة تعادل 2π رادياناً ، ذلك لأن طول محيط الدائرة يساوي 2π مرة نصف قطرها ، فالراديان يساوي تقريباً 57 درجة .

ولما كان الدوران أو الالتفاف يتم حول محور خاص به ، وهذا المحور يعين اتجاهاً في الفضاء ، فالدوران هو كمية متجهة تتعين تعييناً كاملاً باتجاه (هو اتجاه محور الدوران) ، وبمقدار (هو زاوية الدوران) ، أي أن الزاوية بالنسبة إلى الدوران كالمسافة بالنسبة إلى الإزاحة .

ونستطيع أن نتوصل من مفهوم المسافة إلى كميتين جديدتين هما المساحة والحجم ؛ فالمساحة تعرّف على أنها جداء مسافتين بينهما زاوية قائمة ، ويعبر عنها بوحدات المسافة المربعة ، فإذا كانت إحدى المسافتين 4 سنتيمترات والمسافة المتعامدة معها 5 سنتيمترات كانت المساحة المعرفة بهما 20 سنتيمتراً مربعاً ، وتكتب عادة 20 سم^2 . ولما كان بالإمكان توجيه المساحة المستوية في أي اتجاه في الفضاء فهي إذاً متجه ، ولهذا المتجه اتجاه المستقيم العمودي على المساحة ، ويتعين مقداره بالقيمة العددية للمساحة (أي عدد وحدات المسافة المربعة التي تحتويها) . ومن الأمثلة الهامة على المساحات : المثلث ($\frac{1}{2}$ جداء القاعدة في الارتفاع) ، والمستطيل (جداء ضلعيه المتعامدتين) ومتوازي الأضلاع (جداء قاعدته في ارتفاعه) ، والدائرة التي نصف قطرها r (πr^2) ، والكرة التي نصف قطرها r $4\pi r^2$ ، حيث π هي حاصل قسمة محيط دائرةٍ ما على قطرها ، وتساوي تقريباً 3,14159265 .

وأما الحجم فيعرّف على أنه جداء ثلاث (مسافات) اتجاهاتها متعامدة مثنى مثنى ، ويعبّر عنه بمسافة مكعبة . والسنتيمتر المكعب هو حجم وحدة مكعبة (أي مكعبٌ طول كل حرف من حروفه سنتيمتر واحد) . وحجم غرفة ، هو جداء طولها في عرضها في ارتفاعها ، ويعبر عنه بقدم مكعبة فيما لو قيست أبعاد الغرفة بالقدم ، وحجم كرة نصف قطرها r هو πr^3 ($\frac{4}{3}$ ، ولما كانت القيمة π قريبة جداً من 3 ، فإن حجم كرة ما هو أربعة أمثال حجم مكعب طول حرفه يساوي نصف قطر الكرة . إن حجم الكرة الأرضية يساوي تقريباً 256 مليار ميل مكعب ، وقد اكتشف الإنسان نحو جزءٍ من عشرة آلاف من هذا الحجم واستغله . ويبلغ حجم الأرض نحو 64 مرة حجم القمر ، ويبلغ حجم المشتري نحو 1000 مرة حجم الأرض ، أما حجم الشمس فيساوي نحو 1000 مرة حجم المشتري .

الزمن كيان أساسي

إن المكان وحده لا يكفي لبناء المفاهيم التي تدخل في قوانين الطبيعة ، لأن كوننا ليس ساكناً ، بل نشيطاً متحركاً يتطور باستمرار . فلكي نستطيع استنتاج الكميات الثانوية (المشتقة من الكميات الأساسية) التي تدخل في قوانين الطبيعة ، لا بد لنا قبل ذلك ، من أن نُدخل الزمن بصفته أحد المكونات الأساسية . ولقد ورثنا ، منذ ولادتنا ، قابليات ممتازة لتقدير الزمن مثلما ورثنا حس المسافة والقدرة على تقدير المسافات المألوفة بدقة مقبولة . وتتضح هذه المؤهلات في انجازات اللاعبين الرياضيين والموسيقيين والمشعوذين . كما أن إدراك الزمن عند الحيوانات والحشرات وحتى النباتات متطورة أيضاً إلى درجة كبيرة . غير أن الزمان كالمكان لا يمكن تعريفه ، لذلك نكتفي هنا أيضاً بوصف عملية قياس الزمن التي تعطينا عدداً يدل على المدة الزمنية بين حادثين .

لنلاحظ أولاً ، قبل أن نقوم بهذا الوصف ، بأن تيار الزمن لا يمكن أن يكون له معنى إلا إذا حدثت تغيرات نستطيع أن نميّز معها الماضي من الحاضر من المستقبل ، من دون هذه التغيرات لا معنى لقياس الزمن ، ولنلاحظ كذلك أن تجاربنا تدل على أن الزمن يجري في اتجاه واحد لا غير ، وأن الزمن المعكوس لا يحدث أبداً في العالم الجهري (الكِبَري) ، في حين أنه يحدث بمعنى ضيق جداً ، في المجال الذري أو دون الذري . وأخيراً ، إن المدة الزمنية بين حادثين يجب أن تقاس بدلالة نوع من الظواهر الدورية أو المتناوبة التي تقسم المدة الزمنية ، إن صح القول ، إلى سلسلة من المجالات الصغيرة المتساوية التي يقابل كل منها دور الظاهرة أو نوبتها (أي مدة الاهتزازة الواحدة) . وتشكل هذه الظاهرة الدورية ميقاتية يدعى دورها « وحدة الزمن » ، ويمكن أن تكون الميقاتية أيَّ أداةٍ تراوح في تعقيدها من النواس البسيط حتى الميقاتيات الذرية المعقدة والتي اهتزازاتها هي اهتزازات الذرات الإفرادية نفسها .

وتسعى وحدة الزمن الشائعة (الثانية) ، وهي معرفة تعريفاً فلكياً بحيث تحوي السنة المدارية (أي المدة من ربيع إلى ربيع يليه) 31,556926 مليون ثانية . وتراوح المدد الزمنية التي يتعامل الفيزيائيون معها من جزءٍ من مليار تريليون جزءٍ من الثانية كما في الحوادث التي تتم داخل نوى الذرات ، حتى مليارات السنين التي هي أعمار النجوم وعمر الكون . وتبلغ الدقة في قياس المدد الزمنية بوساطة الميقاتيات الدقيقة الأكثر تعقيداً ، جزءاً من تريليون ، كما يمكن تسجيل مدد زمنية قصيرة جداً من رتبة جزءٍ من مليار من الثانية .

مفهوم السرعة العددية

لقد درسنا حتى الآن الكيانين الأساسيين ــ المكان والزمان ــ اللذين سوف نركب منهما بعض الكميات الثانوية التي تدخل في قوانين الطبيعة (أو التي يعبر عن قوانين الطبيعة بدلالتها) ؛

وأول هذه الكميات التي سندخلها الآن سرعة جسم لأنها أبسط هذه الكميات وأكثرها أهمية، فضلاً عن أن السرعة كما سنرى أيضاً، مقترنة بحركة الطاقة (كما في الإشعاع مثلاً). ولقد اهتم نيوتن في المقام الأول بالأجسام المتحركة التي يعد فهم طبيعة السرعة في دراستها شيئاً أساسياً. والسرعة كذلك، هي فعلاً أبسط كمية ثانوية نستطيع تركيبها بدمج المكان مع الزمان. ولتحقيق ذلك. نتابع الجسيم المعني من لحظة إلى أخرى، ولنفرض أنه كان في نقطة مثل A عندما لاحظناه أول الأمر في الزمن t_0، وأنه في نقطة مثل B عندما لاحظناه بعد ذلك في اللحظة t_1، وأنه انتقل من A إلى B على طول خط مستقيم يصل بين النقطتين. نقيس الآن المسافة S من A إلى B ونقسمها على المدة الزمنية $t_1 - t_0$ فنحصل على السرعة V. إن هذا الرمز V يمثّل معدل أو متوسط سرعة الجسم على طول المستقيم الواصل بين A وB؛ وهكذا يتضح من صيغة V ما هي الكميات المقيسة الأساسية التي تدخل في تركيب السرعة ـــ إنها المكان والزمان: ولما كانت ناتجة عن تقسيم المسافة على الزمن لذلك نخص السرعة بوحدة مثل سنتيمتر في الثانية (أو سْم/ثا أو بالرموز اللاتينية cm/sec أو cm sec^{-1})، أو ميل في الساعة أو أي وحدة أخرى للمسافة في وحدة الزمن. فليس علينا إذاً أن ندخل وحدات جديدة لقياس السرعة لكونها كمية ثانوية مشتقة، ووحداتها تتركب، كما رأينا، من وحدات قياس المسافة مع وحدات قياس الزمن.

ولكن لماذا قلنا عن V أنها معدل السرعة أو متوسطها؟ لاحظوا أن المسافة من A إلى B منتهية، أي أن الجسيم يقضي مدة زمنية طولها منته لدى اجتيازه هذه المسافة، فسرعته، في أثناء هذه المدة، يمكن أن تتأرجح بين قيمةٍ وأخرى، مثله في ذلك مثل سيارة تتحرك على طريق عام. فمجرد تقسيم المسافة الكلية على الزمن الكلي يخفف من تباين التأرجحات ويعطينا قيمة متوسطة. ولذلك لا نستطيع أن نعرف من هذه القيمة المتوسطة سرعة الجسيم في لحظة معينة (أي سرعته الآنية)، وعلينا إذاً أن ندرس الآن هذه السرعة الآنية.

لقد حل نيوتن هذه المسألة، أي تعيين السرعة الكلية لجسيم حلاً ذكياً لا بل إن حله لها قاده إلى اكتشاف حساب التفاضل والتكامل الذي يُعدّ وسيلة فريدة لم يكتشف الإنسان بعد وسيلة أقدر منها على التحليل، بل يندر جداً أن نجد تقنيات حديثة أو نظرة عميقة في قوانين الطبيعة أمكن الحصول عليها بدون هذه الوسيلة الرياضية الرائعة الجميلة.

ويمكن تقدير الصعوبات المرتبطة بتعيين السرعة الآنية لجسيم إذا لاحظنا أنه لتعيين سرعة الجسيم يجب رصده في نقطتين مختلفتين على طول مساره وبالتالي في زمنين مختلفين. إن إدخال زمنين مختلفين يتعارض في حد ذاته مع فكرة سرعة آنية، ومع ذلك وعلى الرغم من هذا التعارض نستطيع أن نتساءل: هل نستطيع أن نستنتج السرعة الآنية من قياس السرعة المتوسطة كما سبق أن عرفت؟ من الواضح أن ذلك غير ممكن إذا كانت المدة الزمنية التي نرصد الجسيم أثناءها طويلة إلى حدٍ ما،

لأن ذلك يترك مجالاً لتغيرات قياس السرعة ، والمشكلة هنا هي ماذا نعني بالعبارة «طويلة إلى حد ما» .

دعونا نفترض أن باستطاعتنا إجراء هذا القياس نفسه ، على الجسيم نفسه مرات ومرات ، ولكن بشرط أن نأخذ في كل مرة مدة زمنية أقصر ، أو يمكن أن ننظر للمسألة بطريقة أخرى ، وهي أن نتصور عدداً كبيراً من المراقبين وأن كلاً منهم يقيس السرعة المتوسطة ، ولكنهم يقيسونها في أزمان مختلفة ، تتراوح من القصيرة جداً إلى الطويلة ، ويحصل كل مراقب بوجه عام على جواب يختلف اختلافاً طفيفاً عن جواب من يليه . وهذه الفروق بين قياسات المراقبين المتتاليين ، تتضاءل شيئاً فشيئاً كلما نقصت المدة الزمنية الفاصلة بين قياسين متعاقبين إلى أن تصبح هذه المدة قصيرة قصراً كافياً لجعل قيم السرعة المتوسطة واحدة ، ويمكن تسمية قيمتها عندئذ السرعة الآنية للجسيم في لحظة خاصة ، غير أن هذه السرعة في حقيقة الأمر ليست فعلاً السرعة الآنية ، إذ لا تزال هناك مدة زمنية منتهية مضمنة في تعريفنا ، بيد أن طريقتنا نفسها تدلنا على أن باستطاعتنا دائماً إيجاد مدة تكون من القصر بحيث تعجز أدواتنا المتاحة عن إظهار أي تغير في سرعة الجسيم أثناء هذه المدة ، ولكن قد توجد أدوات أكثر حساسية ودقة تكشف تغير السرعة في أثناء مدة كهذه ، وتضطرنا إلى استخدام مدد أصغر منها إلى أن نحصل على السرعة الآنية ، وذلك باتباع الفكرة العامة نفسها أيضاً .

ولكي نعبّر عن هذه الفكرة جبرياً ، نستخدم الرمز دلتا ($\triangle$) لتمثيل قيمة صغيرة من مقدار ما ، فمثلاً يدل $\triangle t$ على مدة زمنية قصيرة ، فإذا كانت هذه المدة القصيرة هي التي راقبنا في أثنائها الجسيم الذي انتقل أثناء ذلك على المسافة القصيرة $\triangle s$ ، فإنه يكون لدينا $V = \frac{\triangle s}{\triangle t}$. وللحصول على السرعة الآنية ، يجب أن نأخذ $\triangle t$ صغيرة جداً بحيث لا يظهر أي تغير في V قابل للقياس عندما تتابع قيمة $\triangle t$ تضاؤلها . فقياس السرعة الآنية الفعلية ، تتوقف إذاً قيمته التي نحصل عليها على دقة أدواتنا .

ولكننا نستطيع إدخال سرعة آنية نظرية بالطريقة التي اتبعها نيوتن ، إذ تأمّل ملياً في النتائج المترتبة على جعل المدة $\triangle t$ لا متناهية في الصغر ، لقد أدرك نيوتن أن السرعة الآنية لا يمكن إيجادها من الوجهة النظرية إلا إذا تناهت $\triangle t$ إلى الصفر ، وقادته هذه الفكرة البسيطة والنتائج الرياضية التي نشأت عنها إلى حساب التفاضل .

ولكن هذا الإجراء الذي أتاح لمقام الكسر (في هذه الحالة الكسر هو $\frac{\triangle s}{\triangle t}$) أن يتناهى إلى الصفر ، قد يبدو للقارئ الذي لم يدرس حساب التفاضل أنه ذو مخاطر عظيمة (بل إن هذا الإجراء في حقيقة الأمر ممنوع بحسب قواعد الجبر) ؛ بيد أن نيوتن رأى أن النتائج لا تكون سيئة بائسة ، فيما لو انتهت $\triangle s$ في الوقت نفسه مع $\triangle t$ إلى الصفر ، إذ قد يظهر في بادئ الأمر ، أننا

نحصل على النتيجة غير المعينة $\frac{0}{0}$ ولكن النسبة $\frac{\triangle s}{\triangle t}$ يكون لها في الحالة الراهنة قيمة منتهية حين تنتهي $\triangle t$ إلى الصفر، وهذه القيمة هي سرعة الجسيم الآنية. وقد كانت مساهمة نيوتن العظيمة هي أنه أثبت أن الأمر هو بالفعل كذلك، وأنه بيّن كيف أن هذه القيمة أو «النهاية» كما تدعى، يمكن أن يحسبها المرء فيما لو عرف كيف ترتبط المسافة التي يقطعها الجسيم بالزمن. ونحصل على السرعة الآنية عندئذ، بأن نجعل $\triangle t$ لا متناهية في الصغر. وهكذا كان منهج نيوتن هذا أساساً لحساب التفاضل، ونقول حين نطبقه بأننا نجد «مشتق» s، أو أننا «نفاضل» s بالنسبة إلى الزمن. وقد مثّل نيوتن هذه العملية (عملية الاشتقاق) بأن وضع نقطة فوق s (هكذا $\dot{s}$) وسماها «جريان» Fluxion. أما ليْبنتز الذي يُنسب إليه أيضاً ابتكار هذا الحساب فقد سماها «المشتق».

مفهوم السرعة المتجهية Veloeity

أدخلنا فيما سبق مفهوم السرعة المتوسطة لجسم ورأينا أننا نحصل عليها من تقسيم المسافة التي يقطعها الجسم في مدة زمنية معينة على الزمن الذي استغرقه لكي يقطع هذه المسافة. غير أن سرعة الجسم العددية ليست إلا جانباً واحداً فقط من حركته، لأننا إذا قلنا مثلاً أن سيارة تتحرك بسرعة 50 ميلاً / ساعة فإننا لا نكون قد أعطينا، كما هو واضح، إلا جزءاً فحسب من الإعلام الذي نحتاجه لتحديد سير السيارة. فلكي نحدّد سير جسم ما، لا يكفي أن نعرف سرعته العددية فحسب في كل لحظة بل يجب أن نعرف أيضاً اتجاه حركته. وحين نحصل على اتجاه حركة الجسم وعلى سرعته العددية أيضاً نحصل على متجه سرعته، أي أن السرعة الحقيقية هي كمية متجهة مقدارها السرعة العددية واتجاهها يمثَّل بسهم مسدد في اتجاه حركة الجسم في كل لحظة.

ولكي نمثل بيانياً متجه سرعة جسيم، ننظر إلى مساره المنسوب إلى مرجع مقارنة أو إسناد (وهنا يجدر بنا أن نلاحظ أنه من دون مرجع مقارنة لا يمكن أن ننسب أي معنى على الإطلاق للسرعة المتجهية). إن كل نقطة مثل A من المسار يمكن أن نخصها بعدد هو سرعة الجسيم العددية عندما مر بهذه النقطة، ولكن كيف يجب أن نمثل اتجاه حركته؟ لكي نفهم كيف يتم ذلك على صورة أفضل، دعونا نلاحظ نقطة أخرى B من المسار قريبة جداً من A ولنفترض على سبيل التصور أن الجسيم يسير مباشرة من A نحو B، وعلى خط مستقيم، بدلاً من أن يسير على طول قوس المسار المنحني من A إلى B. إن اتجاه حركة الجسيم في هذه الحالة يصبح على طول الخط المستقيم A B بدلاً من أن يكون في اتجاهه الفعلي. فلو أخذنا B أقرب مما كانت إلى A لأصبح اتجاه الخط المستقيم من A إلى B أقرب إلى اتجاه الحركة الفعلي في A. وهكذا نرى أن باستطاعتنا إيجاد اتجاه حركة الجسيم (أو متجه سرعته) في A بأن نترك B تقترب بلا تناه من A، ونأخذ عندئذ الخط المستقيم من A إلى B على أنه هو هذا الاتجاه. ولكننا حين نفعل ذلك، فإن هذا المستقيم الذي وصلنا إليه (وبالتالي

اتجاه متجه السرعة في A) ليس إلا المستقيم المماس في النقطة A . وما نعنيه بقولنا مستقيم مماس في A هو أنه مستقيم يمس المنحني في A ولكنه لا يقطعه .

نخلص مما سبق إلى أنه لتمثيل متجه سرعة جسيم في نقطةٍ من مساره ، نرسم المستقيم المماس للمنحني (المسار) في هذه النقطة ، ونجعل طوله (بحسب سلم معين) مساوياً لسرعة الجسيم العددية (في هذه النقطة) . إن متجه سرعة الجسيم يتغير مقداره واتجاهه عند الانتقال على طول مساره ، وإذا عرفنا متجه سرعة جسيم في كل لحظة من حركته فإننا نستطيع عندئذ أن نرسم مساره ، لأن كل ما يجب أن نفعله هو أن نمرر منحنياً من بداية متجه سرعته (أي من طرف المتجه دون السهم) بحيث يكون هذا المنحني مماساً للمتجه ، في كل وضع من أوضاعه بدون أن يقطعه ، وعندئذ يصبح متجه السرعة في كل وضع مماساً لمسار الجسيم .

مفهوم التسارع

إن لمتجه السرعة شأناً في جميع دراساتنا لقوانين الطبيعة ، فهو أول الكيانات الفيزيائية التحريكية التي يمكن أن نكوّنها من المكان والزمان وهو أبسطها ومن أهمها ، ولكننا لا نستطيع ، به وحده ، أن نعمل الكثير . فلقد أدرك غاليليو ، وبخاصة نيوتن من بعده ، هذه الحقيقة ولم يقنعا بعلم أرسطو الذي لم يذهب إلى أبعد من متجه السرعة لبناء نظريته في التحريك (الديناميك) ، ورأى نيوتن أن الديناميك الصحيح يجب أن لا يأخذ في الحسبان متجه السرعة فقط بل تغيرات هذا المتجه أيضاً . وفي الحقيقة ، لو أن متجهات سرع الأجسام التي تكوّن عالمنا كانت ثابتة (لا تتغير) ، لما أمكن أن توجد بنىً مثل الذرات والنوى والجزيئات والكواكب والنجوم والمجرات ، بل إن تغيراً في متجه السرعة بحد ذاته لا يعطينا كل ما نحتاجه لصياغة قوانين الديناميك الصحيحة — إذ يجب أن نستخدم (أو نتعامل مع) معدل تغيرات السرعة المتجهية ، وهي ما ندعوه « التسارع » ، ولا شك أن تعرُّف الدور الحاسم الذي يقوم به التسارع في الديناميك كان أحد أخطر الاكتشافات في تاريخ العلم ، لذلك من المستحسن والمفيد أن نفهم طبيعة التسارع (أي كل تغير في السرعة العددية أو في اتجاه الحركة) فهماً واضحاً ومناسباً ليكون تمهيداً لدراسة قوانين نيوتن في الحركة .

ولا شك أن أجسامنا تتحسس معنى التسارع ، سواء فهمناه بوعينا أو لم نفهمه ، لأننا نغير وضعنا الحركي دائماً حالما نباشر الحركة ، كأن نكون في لحظةٍ ما في وضع السكون ثم نمشي بتمهل ثم نركض بعد حين ؛ فنحن ندرك دائماً هذا التغير من حالة حركية إلى التي تليها . ويصح هذا أيضاً فيما لو كنا نسوق مركبة ، ولكننا ندرك حينئذ كذلك كم هي سريعة أو بطيئة سرعة حدوث هذه التغيرات ، وهذا هو جوهر التسارع — أي معدل تغير حالتنا الحركية أو سرعتنا المتجهية — ويمكن القول إن معدل التغير في السرعة العددية وفي اتجاهها أو معدل التغير في اتجاهها فحسب .

ونحن عادة لا نهتم بمعدل تغير متجه سرعتنا (أي بتسارعنا) إلا بحسب درجة نشاطنا. فالتسارع لا أهمية له إذا كنا نسير متمهلين في خط مستقيم، ولكنه يصبح ذا شأن كبيراً جداً إذا كنا نلعب شوطاً سريعاً بكرة المضرب، لأننا، في هذه الحالة، نغير باستمرار متجه سرعتنا، كما يتوقف نجاحنا، إلى حد كبير، على تسارعنا. وحين نقود سيارة، ندرك باستمرار تسارعها حالما نبطىء حركتها أو نزيد سرعتها العددية أو نغير اتجاهها. وهكذا تُظهر لنا هذه التجارب بأن التسارع يتضمن بوجه عام ظاهرتين نموذجيتين: تغيراً في سرعة الجسم العددية بدون أن يتغير اتجاه حركته، أو تغيراً في اتجاه حركته بدون أن تتغير سرعته العددية، ويمكن أن يحدث التغيران معاً وهذه هي الحالة العامة. ولكن من الأنسب أن ندرس الظاهرتين كلاً على حدة، وهذا ما سنفعله الآن باختصار.

إذا كانت سرعة الجسم العددية تتغير باستمرار بدون أن يتغير اتجاهه، كما في حالة سيارة تزداد سرعتها العددية بانتظام في أثناء حركتها على طريق عامة مستقيمة، فإنه يمكن عندئذ حساب تسارعها بسهولة من سرعتها الابتدائية وسرعتها النهائية أثناء مدة زمنية معينة. فمثلاً: إذا زيدت سرعتها العددية زيادة مطردة من 5 أميال في الساعة إلى 45 ميلاً في الساعة أثناء 10 ثوانٍ، فإن تسارعها عندئذ يساوي 4 أميال في الساعة في الثانية (أو كل ثانية). وهناك مثال مهم على هذا النوع من التسارع وهو تسارع سقوط الجسم سقوطاً حراً في الفراغ. وكان غاليليو، كما ذكرنا، أول من قاسه بدقة؛ وقد برهن أيضاً على أن جميع الأجسام التي تسقط في الفراغ في موقعٍ واحد من الأرض، تسقط كلها بالتسارع نفسه.

ومما يسهل تحليل تسارع الجسم المتحرك، تجزئةُ حركته إلى ثلاث حركات مستقلة تحدثً في ثلاثة اتجاهات متعامدة مثنى. فنحن نستطيع، على سبيل المثال، دراسة حركة قذيفة (أي حركة جسم قُذف إلى الأعلى باتجاه اختياري) بأن نفْصل حركتها الشاقولية عن حركتها الأفقية، فتسهل بذلك الأمور، لأن حركة الجسم الشاقولية وحدها هي المتسارعة بتأثير الثقالة، أما الحركة الأفقية فهي غير متسارعة. وعندئذ نحصل على الحركة الكاملة بأن نركّب معاً الحركتين، الأفقية والشاقولية، اللتين لا تؤثر إحداهما في الأخرى إطلاقاً.

لقد نظرنا فيما سبق في حالة جسم يتحرك حركة متسارعة على خط مستقيم وكان تسارعه عليه إذن وفق خط حركة الجسم نفسه (سواء أكانت السرعة العددية تزداد أم تنقص). فلندرس الآن تسارع جسم يتحرك بسرعة عددية ثابتة على دائرة ثابتة القدر (أي أن نصف قطرها r ثابت). إن اتجاه التسارع في هذه الحالة متعامد دوماً مع متجه سرعة الجسم الذي يبقى ملازماً لمحيط الدائرة، لذلك لا يمكن أن يوجد جزء من التسارع على خط متجه سرعة الجسم، لأنه لو وجد هذا الجزء لازدادت سرعة الجسم العددية أو لنقصت باطراد. وهكذا نرى أنه إذا تحرك جسيم على دائرة بسرعة عددية ثابتة، فإن اتجاه تسارعه يتغير باستمرار مع بقائه دائماً متجهاً نحو

مركز الدائرة .

ولكن مقدار هذا التسارع يظل ثابتاً وإن ظل اتجاهه يتغير باستمرار ، وليس صعباً جداً تصور ذلك (المقدار) فيما لو تخيلنا أنفسنا نقود سيارة على طريق دائري تماماً وكانت سرعتنا العددية ثابتة ، ذلك لأن ما يتغير هو اتجاه السيارة فحسب ، أما تسارعها (أي معدل تغير اتجاهها) فيتعين بسرعتها العددية وبكبر دائرة الطريق . ولبيان ذلك دعونا نفرض أن دائرة الطريق كبيرة ، وأننا احتجنا لاجتياز نصفها بسرعتنا التي نسير فيها إلى مدة 10 دقائق ، فمتجه سرعتنا يتغير اتجاهه بمقدار 180° في 10 دقائق . فلو كنا نسير على طريق أكبر بمرتين (أي نصف قطره أكبر بمرتين) لاحتجنا إلى 20 دقيقة كي نجتاز نصفه ، وهكذا يصبح تسارع السيارة نصف ما كان عليه بوصفه مقداراً . وقياساً على ذلك فإن مقدار تسارع جسمٍ ما في حركة دائرية يتغير تغيراً عكسياً مع نصف قطر مداره الدائري . (أي كلما صغرت الدائرة كبر التسارع) .

دعونا ننظر الآن في كيفية ارتباط تسارع السيارة بسرعتها العددية . فكلما سارت السيارة بسرعة أكبر أي (سرعتها العددية أكبر) ، أصبح تغير اتجاه حركتها أسرع ، وبالتالي ، طبعاً ، تغير متجه سرعتها . وهكذا يتوقف تسارعها حتماً على سرعتها العددية (ويتزايد معها) . ولكن هذه العلاقة (بين التسارع والسرعة العددية) أشد تأثيراً من علاقة التسارع بنصف القطر . وهذه نقطة دقيقة ، لذلك دعونا نرى إذا كنا نستطيع تحليلها اعتماداً على حركة الجسم لكي نصل إلى الإجابة الصحيحة عنها . لقد ذكرنا سابقاً أن ارتباط التسارع بالسرعة العددية هو ارتباط مباشر (مطرد) ، وهذا واضح ، ولكن السرعة العددية تتدخل بصفة معامل آخر ، لأن السيارة ، كلما أسرعت في سيرها ، أصبحت أكثر نزوعاً إلى الخروج عن مضمارها الدائري ، فلا بد عندئذ أن يُزاد تسارعها (إلى الداخل) لكي يلزمها على السير في مضمارها . كما أن السيارة كلما أسرعت في سيرها ، يجب أن يزداد تغير متجه سرعتها في وحدة الزمن ، لكي يجعلها تحافظ على حركتها وفق المضمار . فتسارعها يتعلق إذن بسرعتها العددية بطريقتين مختلفتين ، وكل منهما تزيد التسارع بالمعامل نفسه V (أي بالسرعة العددية) . فالتسارع الدائري إذن ، يتزايد باطراد مع V^2 (أي مع مربع السرعة العددية) . أو بعبارة أخرى : إذا تحرك جسيم على دائرة نصف قطرها r بسرعة عددية ثابتة V ، فإن تسارعه يظل متعامداً مع منحى متجه سرعة الجسيم ، ويساوي $\frac{V^2}{r}$ ، ويظل متجهاً نحو مركز الدائرة .

في الحقيقة ، إن الحركة الدائرية ذات أهمية فائقة ، لأنها تقوم بدور حاسم عبر الفيزياء كلها . فهي تتميز بأهمية خاصة في الفلك ، وهذا يتضح من دوران الأرض حول محورها ودوران الكواكب حول الشمس ودوران النجوم في مجرتنا حول مركز هذه المجرة .

وثمة نوع هام آخر من التسارع ، يرتبط بحركة جسيم يتحرك على دائرة بسرعة عددية ثابتة . لنتخيل أننا سلطنا على الجسيم في أثناء حركته على الدائرة ضوءاً ألقى بظل هذا الجسيم على قطر معين

في الدائرة . فهذا الظل سيتحرك بالتالي على طول القطر جيئة وذهاباً عندما يدور الجسيم على دائرته . وهو يتميز بتسارع من نوع خاص جداً على طول قطر الدائرة يجعله يتحرك حركة تدعى « حركة توافقية بسيطة » ، إذ نلاحظ أن هذا التسارع في الحركة التوافقية البسيطة يتجه دوماً نحو مركز القطر (منتصفه) ، وأنه بالتالي معاكس دوماً* لمتجه سرعة ظل الجسيم . أما مقداره ، فيزداد باطراد مع ازدياد بعد الظل عن المركز . لذلك يتناقص متجه سرعة الظل ليبلغ أدنى قيمة له عندما يتوقف (آنياً) عند أي طرف من طرفي القطر ، ثم يعود فيتزايد عند اقتراب الظل من المركز حيث تكون سرعة الظل في أعلى قيمة لها ويكون تسارعه مساوياً الصفر . وثمة مثالان بسيطان على الحركة التوافقية البسيطة : (1) حركة الكرة الموجودة في طرف نواس عندما يتأرجح ضمن قوس صغيرة (وهي حركة توافقية بسيطة تقريباً) ، (2) حركة جسيم يقع عند طرف وتر مهتز (وهي حركة توافقية بسيطة حقيقية) .

وترتبط بكل حركة توافقية بسيطة ثلاث كميات فيزيائية هامة (قابلة للقياس) ، وهي : (1) سعة الحركة (أو نصف القطر الذي يهتز عليه الظل) ، (2) دور الحركة (وهو مدة الهزة الكاملة أو الدورة) ، (3) تواتر الحركة (وهو عدد الاهتزازات في الثانية) . فدور الحركة التوافقية البسيطة يساوي عددياً مقلوب تواترها . وللحركة التوافقية البسيطة أهمية فائقة في دراسة الفيزياء وفي تحليل حركات الأجسام ، إذ أثبت الرياضي الفرنسي العظيم البارون ج . ب . ج . فوربيه **J.B.J.Fourrier** في القرن التاسع عشر ، أن كل حركة ، مهما تكن معقدة ، فإنه يمكن التعبير عنها بمجموع حركات توافقية بسيطة أو تفكيكها إلى هذا المجموع . وهذا التفكيك ، الذي يدعى تحليل فوربيه ، يمكن استخدامه في أكثر الأحيان لتبسيط المسائل الديناميكية أو الحركية أو الضوئية أو الترموديناميكية .

قوانين الحركة ــ مفهوم القوة

إن مفهومي المكان والزمان الأساسيين يؤديان إلى كيانين متحدرين منهما ، وهما متجه السرعة ومتجه التسارع ، ولكنهما لا يعطياننا أي نظرة عميقة في ديناميكية الحركة . لذلك نحن بحاجة إلى مفهوم أساسي آخر ، لا غنى عنه للديناميك ، كي يكون جسراً ممتداً فوق الفجوة بين الهندسة والمادة . ولقد سبق أن أدخلنا عند دراستنا لطبيعة القانون ، مفهوم الحادث ، الذي عرفناه بأنه انطباق جسيم على نقطة في الفضاء في لحظة معينة ؛ فالحوادث لا معنى لها إلا بصلتها مع المادة (وهي هنا الجسيمات) . والحقيقة ، أننا لا نستطيع أن نتصور تماماً ، عمليات قياس المكان والزمان التي سبق أن درسناها ، بدون أن نستخدم المادة ، كما لا يمكن أن نتصور المادة بدون مكان وزمان . وقد

* ليس دوماً ، إذ عندما يتحرك الظل نحو المركز يكون متجه سرعته متفقاً مع متجه التسارع ؛ ولا يعاكسه إلا عندما يبتعد الظل عن المركز .

يتساءل المرء في هذا المجال عما إذا كان من الممكن أن تُستمد المادة من المكان والزمان ليتحول كل شيء إلى هندسة. ولكن لم يستطع إنسان حتى اليوم أن يبيّن كيف يمكن أن يتم هذا، لذلك، كان لا بد لنا من إدخال كيان أساسي جديد، هو «جسر المكان ــ الزمان ــ المادة».

وقد كان باستطاعتنا طبعاً أن نُدخل المادة نفسها (أي الكتلة) بصفتهاالعنصر الأساسي الثالث، ثم نستنتج طبيعة الجسر من قوانين نيوتن الديناميكية، غير أن هذا الإجراء غير مرضٍ، لأن من الصعب إدراك كيفية إدخال وحدة الكتلة وكيفية استخدامها، إذ ليس هناك أي طريقة عملية مباشرة لقياس كتلة جسيم بموازنته مع وحدة كتلة إلا إذا افتُرضت افتراضات إضافية؛ فلكي نتجنب هذا الإجراء غير المرضي، علينا أن ندخل الكتلة بطريقة مختلفة كلياً عن طريق إدخال المكان والزمان، وذلك بأن ندخل القوة (بدلاً عنها) بوصفها هي الكمية الأساسية الثالثة والنهائية.

والقوة مفهوم نتلقنه بصورة طبيعية، لأننا نتحسسها ونتعرفها مثلما نتحسس المكان والزمان ونتعرفهما، فهي جزء متأصل جداً من تكويننا النفسي والفيزيولوجي، حتى أننا لا نجد أي مشقة في إنشاء ميزان للقوى التي تعرضنا لها كلنا منذ ولادتنا، وهذا ما مكننا من إنجاز وظائفنا اليومية بمجهود بسيط. إن هذا الميزان الذي يؤدي عمله بوساطة نهايات عصبية حساسة خاصة تدعى متقبلات ذاتية يتيح لنا تقدير القوى بدقة كبيرة. ونحن نتصور هذه القوى إما جاذبة وإما نابذة، لأن عضلاتنا تستطيع أن تسحب أو تدفع. ولنلاحظ أخيراً أن للقوة صفة المتجه، لأننا نستطيع أن نسحب جسماً ما أو ندفعه في أي اتجاه نشاء وبمقادير (أو شدات) متفاوته.

ومع أننا نستطيع أن نقدّر القوى بدقة لا بأس بها، فإننا نقوم بذلك من دون أن يكون في ذهننا وحدة للقوى. ولكن هذا لا يصح إذا أردنا أن نربط القوى بالديناميك، إذ يجب عندئذ أن نُدخل وحدة محددة للقوة. وهذا ما فعله الفيزيائيون، فقد عرّفوا «الدينة» dyne، وهي وحدة صغيرة جداً، إذ يلزم نحو 450000 دينة لكي تساوي قوة باونْد (رطل إنكليزي). ولكن القوة تقاس عادة بمقدار الاستطالة التي تُحدثها في نابض معين.

والآن، بفرض أننا استوعبنا مفهوم القوة، نستطيع أن نعلن قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة التي تُعد أسس الميكانيك والديناميك التقليديين، ومنها نستطيع الوصول إلى تعريف الكتلة. وأول هذه القوانين الذي يشار إليه غالباً باسم «قانون العطالة» ــ ينص على أن كل جسم في حالة سكون أو في حالة حركة مستقيمة منتظمة يظل على سكونه، أو يستمر في حركته المستقيمة المنتظمة ما لم تؤثر فيه قوة لا توازنها قوة أخرى تعاكسها ــ (نقول: غير متوازنة unbalaneed)، وهذا يعني ببساطة، أن حالة الحركة لجسيمٍ ما (ومن ضمنها السكون بصفته حالة حركة) لا يمكن أن تتغير إلا بتأثير قوة غير متوازنة. فالتغير في حالة الجسم الحركية يُستدل منه على وجود قوة غير متوازنة. ومما يجدر ذكره أن أي جسم يمكن أن يظل تحت تأثير مجموعة من القوى، ولكن حالة الجسم الحركية

لا تتغير إلا إذا لم ينعدم مجموع هذه القوى المؤثرة فيه (أي إذا وجدت قوة واحدة غير متوازنة). ولما كان تغير حالة الجسم الحركية يعني تسارعه، فالتأثير الذي تحدثه قوة غير متوازنة في جسمٍ ما، هو — كما يتبين مما سبق — تسريع حركته.

ويبين قانون نيوتن الثاني في الحركة، علاقةً «كمية» بين القوة المطبقة على الجسم والتسارع الذي تكسبه إياه. وكان نيوتن على بينة من أنه يجب أن يكون للتسارع اتجاه القوة وأن يتناسب معها طرداً، وقد عبّر عن هذه الفكرة بقوله: إذا أثرت قوة غير متوازنة في جسم ما، فإن هذا الجسم يكتسب تسارعاً في اتجاهها، وحاصل قسمة مقدارها على مقدار التسارع يظل هو نفسه (ثابتاً) مهما كان مقدار هذه القوة. ويعبّر عن هذه الفكرة جبرياً بالمعادلة: $F = ma$، التي يدل فيها F على القوة المؤثرة، وa على التسارع، وm على الثابت الذي طابقه نيوتن مع كتلة الجسم العطالية. إن هذه المعادلة، على بساطتها، هي التي بشرت بمولد العلم الحديث، وهي من أشهر المعادلات في تاريخ العلم، ويشار إليها عادة باسم «معادلة نيوتن في الحركة». وهي أيضاً أساس الديناميك النيوتني كله، وقد ظلت سائدة في الفيزياء كلها حتى مطلع القرن العشرين حين استبدلت بها نظرية الكم ونظرية النسبية عدداً من المظاهر غير المألوفة.

وهناك أمور لا بد من الإشارة إليها في هذه المعادلة، أولها أنها تعرّف كتلة الجسم التي يجب أن تعامل بوصفها كمية ثانوية لا أساسية، وتبيّن طريقة عملية لقياسها، وهي كما يلي: تطبق على الجسم قوة مقدارها معلوم ونقيس تسارعه في اتجاه القوة المؤثرة، ثم نقسم مقدار هذه القوة على مقدار التسارع، فيكون حاصل القسمة هو كتلة الجسم. وإذا كانت القوة مقدّرة بالدينات، والتسارع بالسنتيمترات في الثانية في الثانية (سم/ثا^2) فإن الكتلة تكون مقدرة بالغرامات. إن هذه الطريقة تؤدي إلى تعريف وحدة الكتلة بالصورة التالية: إذا اكتسب جسم ما تسارعاً قدره 1 سم/ثا^2 عندما أثرت فيه قوة مقدارها 1 دينة (وحدة قوة)، فإن كتلته تساوي 1 غرام (وحدة كتلة).

أما الميزة الثانية التي تستحق الاهتمام في قانون نيوتن للحركة فهي طبيعته المتجهية، فهو يربط كمية متجهة — القوة — بأخرى مثلها — التسارع — وهذا يعني أن القانون يتضمن ثلاث معادلات مدْرجة في معادلة واحدة، إذ إننا نستطيع أن نتصور القوة المؤثرة في جسم ما، على أنها مؤلفة من ثلاث مركبات متعامدة مثنى مثنى وتؤثر في الجسم كلاً منها بمعزل عن الأخرى، (وفي ثلاثة اتجاهات متعامدة مثنى مثنى). ونحصل بذلك على ثلاث معادلات مستقلة للحركة، يمكن معالجتها بسهولة أكثر من المعادلة المفردة الواحدة، لأن كلاً من المعادلات الثلاثة يعالج الحركة المقصورة على اتجاه واحد فحسب.

وأخيراً، فإن هذا القانون عام إلى أبعد الحدود، بمعنى أن صيغته هي نفسها مهما كانت

طبيعة القوة. وكانت القوى الوحيدة المعروفة عند نيوتن هي قوى الثقالة وقوة الدفع أو الجر التي يمارسها جسم على آخر؛ ولكنه لم يميِّز، حين أعلن قانونه الثاني، بين هذه القوى، بمعنى أنها كلها تُحدث تسارعات من النوع نفسه حين تؤثر في جسم معين؛ فطبيعة القوة لا أهمية لها في القانون، وكل ما يهم هو مقدار القوة واتجاهها. ولكن هذا القانون نفسه، مهما تكن أهميته وقدرته، لا يحل المسألة الديناميكية وهي إيجاد مسار أو مدار جسيم تؤثر فيه قوة، ولا نستطيع حل هذه المسألة، إلا إذا عرفنا طبيعة القوة (أي خواصها الهندسية والفيزيائية)، وذلك بالتعويض عن F في معادلة نيوتن بعبارة جبرية، وعندئذ نحل المعادلة لإيجاد تسارع الجسيم ومن ثم الحصول على مداره.

ولا يختلف قانون نيوتن الثالث في بساطته عن القانونين السابقين، ولكنه يُدخل في تأثير القوى تناظراً متميزاً لا يظهر في القانونين الأوليين. فهو ينص في المقام الأول على أن القوى لا تظهر في الطبيعة إلا على صورة ثنائيات، تتألف كل ثنائية منها من قوتين متساويتين ومتعاكستين. ولفهم هذا القانون فهماً أفضل، ندرس التأثير المتبادل بين جسمين يشد كل منهما الآخر بفعل الثقالة، مثل الشمس والأرض. فالقانون الثالث ينص على أن مقدار جذب الشمس للأرض يساوي مقدار جذب الأرض للشمس ويعاكسه وأن الجذبين يعملان على المنحى نفسه، ولكن كلاً منهما يعاكس الآخر. ولقد نص نيوتن على هذا القانون بأعم طريقة كما يلي: إذا أثر جسم A في جسم B بقوة من أي نوع كانت، فإن الجسم B يؤثر عندئذ في الجسم A بقوة تساويها تماماً وتعاكسها (وهذا ما يعرف بقانون الفعل ورد الفعل: كل فعل في الطبيعة يرافقه رد فعل يساويه ويعاكسه)؛ وسندرس هذا القانون بتفصيل أوسع في الفصل السادس.

قانون نيوتن في الثقالة ومعاصروه

«تمر كل حقيقة علمية كبيرة عبر ثلاث مراحل: في الأولى، يقول الناس إنها تتعارض مع الكتاب المقدس، وفي الثانية يقولون لقد سبق أن اكتشفت من قبل، وأخيراً يقولون لقد كنا دائماً نؤمن بها».

ــ لوي أغاسيز*

يمكن تقسيم قوانين الطبيعة التي يدرسها العلماء إلى ثلاث فئات مختلفة يتم شرح كل منها بتفصيل في أكثر الأحيان شرحاً مستقلاً، مع أنها مترابطة. تتألف الفئة الأولى، وهي الفئة الأساسية، من تلك القوانين أو النظريات أو التأملات التي تعالج المكان والزمان. ففي ميكانيك نيوتن ونظريته، يُفترض أن المكان مستقل عن الزمان وبالعكس، وأن هندسة المكان إقليدية أو منبسطة كما يُفترض، إضافة إلى ذلك، أن المكان مطلق (بمعنى أن المسافات بين الحوادث هي نفسها بالنسبة إلى جميع المراقبين)، وأنه يمتد إلى ما لا نهاية. ويُفترض كذلك أن الزمان مطلق، وأنه يجري باستمرار من ماضٍ لا بداية له، إلى مستقبل لا نهاية له. ولكننا سنوضح عند دراستنا لنظرية الكم ونظرية النسبية كيف كان من الضروري تبديل هذه المفاهيم الإقليدية والمطلقة.

وتتألف الفئة الثانية من قوانين الحركة، وهي قوانين تبين العلاقة بين حركة الجسم والقوة التي تؤثر فيه بحسب ما يتضح من قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة. ولا تظهر في هذه القوانين طبيعة القوى التي تعمل على تغيير الحالات الحركية، بل كل ما في الأمر أنها أحكام عامة ــ لا نستطيع أن نستنتج بدونها طبيعة البنى الأساسية في الكون (مثل الذرات والجزيئات والكواكب والنجوم). ولما كان

* Loui Agassiz (1807-1872) عالم طبيعي سويسري أمريكي، اشتغل بعلم الحيوان والجيولوجية وكانت بحوثه في أحافير (مستحاثات) الأسماك وحركة الجليد والرواسب الجليدية وكان معارضاً قوياً لنظريات داروين.

وصفها لحالة الجسم الحركية يتضمن المكان والزمان معاً، فإن قوانين الحركة تتوقف على الهندسة التي حكمنا بأنها هندسة المكان، وعلى تصوراتنا عن العلاقة بين المكان والزمان.

وتتألف الفئة الثالثة من القوانين التي تصف قوى الطبيعة، ومن بينها قانون نيوتن في الثقالة. ونحن نعرف أو نفترض اليوم وجود أربع قوى أساسية في الطبيعة، وهي: الثقالة والقوة الكهرطيسية وقوة التأثير المتبادل (أو التفاعل) الضعيف (وهي نوع خاص ذات شدة ضعيفة تحافظ داخل نوى الذرات على توازن مناسب بين عدد النترونات والبروتونات)، والقوة النووية الشديدة. وسنكتفي هنا بدراسة الثقالة التي يمكن أن نعرّفها بأنها القوة الرئيسية في الكون، لأنها تسيطر على بنى ضخمة جداً مثل الكواكب والنجوم والمنظومة الشمسية والمجرات والكون نفسه، بل لولاها لما قامت لهذه البنى كلها قائمة.

ويتضمن قانون قوةٍ ما أمرين لا صلة بينهما: الأول هندسي، بمعنى أنه يصف ارتباط مقدار القوة واتجاهها بالصلات الهندسية القائمة بين الجسمين اللذين يتبادلان التأثير، والأمر الثاني خاص بصميم هذين الجسمين نفسيهما، بمعنى أن القانون يبين ارتباط مقدار القوة بخاصة فيزيائية موجودة في كل منهما. كما يمكن أن ترتبط قوة التأثير المتبادل بين جسمين بحالتهما الحركية، إلا أن هذا لا ينطبق على قانون نيوتن في الثقالة.

ومن المحتمل أن نيوتن اهتدى إلى صيغة قانون الثقالة، من ثالث قوانين كبلر في حركة الكواكب، ومن ثاني قوانين نيوتن في التحريك، إذ يستطيع المرء أن يتخيل نيوتن وهو يتأمل سقوط تفاحة، ويفكر في الوقت نفسه في ثاني قوانينه الذي ينص على أن التسارع يستلزم وجود القوة: إن التفاحة تسقط متسارعة نحو الأرض، فالأرض لها بالتالي قوة تأثير في التفاحة؛ وهكذا تولدت في ذهنه فكرة قانون الثقالة. وليس المهم أن يكون ذلك قد جرى بهذه الطريقة فعلاً بل المهم أن حدس نيوتن الجريء، بأن الأرض وكل الأجسام في واقع الأمر لها تأثيرها الثقالي، هو الذي كان بداية تطور واسع لأفكار عميقة بلغت أقصاها في إنجازات أينشتاين العظيمة.

ولم يكن حدس نيوتن في الحقيقة سوى بداية لصياغة قانون الثقالة، فقد بقي عليه بعدئذ أن يبين ارتباطاته الهندسية والصميمية التي تحدثنا عنها. ويستطيع المرء أن يستنتج بسهولة من قانون كبلر الثالث طريقة ارتباط مقدار قوة الثقالة بين الشمس وكوكب ما بالمسافة الفاصلة بينهما. وهذا ما لم يستطع أن يقوم به كبلر لأنه لم يكن يفكر بأن تأثير الشمس في الكوكب يقع على طول الخط الواصل منه إلى الشمس في حين فكر نيوتن بذلك. غير أن نيوتن ذهب في تفكيره إلى أبعد من حصر قوى الثقالة بالأرض والشمس والكواكب، فقد عمم مفهوم الثقالة وافترض أنه عام شامل، بمعنى أن جميع ذرات الكون يشد بعضها بعضاً بقوى ثقالية. ولكي يبين ذلك كتب عبارة جبرية تعطي التأثير المتبادل الثقالي بين أي جسيمين مهما كانت كتلتاهما، وتفصل بينهما مسافة

ما أياً كانت .

وقد لجأ نيوتن لتبسيط الأمر إلى تصور كتلتين نقطيتين (أي جسيمين ليس لهما حجم أو شكل)، وتخلص بذلك من المشاكل التي يمكن أن تنشأ عن شكل الأجسام المتبادلة التأثير أو عن حجمها، وطرح المسألة التالية: إذا كان لدينا كتلتان m_1 وm_2 (ترمز m إلى الكتلة، أما الرقمان 1 و2 المكتوبين في الأسفل فللدلالة على الجسيمين الأول والثاني) وفرضنا أن المسافة الفاصلة بينهما r، فما مقدار التأثير المتبادل الثقالي بينهما وفي أي اتجاه يعمل؟ إن ما نعنيه هنا بالتأثير المتبادل هو قوة جذب m_1 لكتلة m_2 أو m_2 للكتلة m_1، والجذبان بحسب قانون نيوتن الثالث متساويان ومتعاكسان .

ولقد استدل نيوتن من بعض الملاحظات العامة جداً المتعلقة بالتناظر أن القوة يجب أن تكون في منحى الخط الواصل بين الكتلتين. فلولا ذلك لبدأ كل من الجسيمين بالدوران حول الآخر، ولاكتسب الجسم، الذي يُترك لكي يسقط سقوطاً حراً، حركة أفقية مماثلة تماماً لحركته الشاقولية، وهذا طبعاً خلاف ما يحدث فعلاً في عالم الواقع.

وبعد أن انتهى نيوتن من تحديد اتجاه القوة، التفت إلى مقدارها. ولقد أشرنا منذ قليل إلى أن للمقدار جانبين، أحدهما هندسي (يتعلق بالبعد بين الجسيمين)، والآخر صميمي (يتعلق بكتلتي الجسيمين). ولكي يحدد نيوتن الجانب الأول في قانون الثقالة فكر على النحو التالي: لما كانت قوة الثقالة تنتشر من الجسيم بانتظام وفي جميع الاتجاهات بالدرجة نفسها، فلا بد أن تتناقص شدة قوتها مع مربع المسافة بين الجسيمين، فإذا تضاعفت هذه المسافة انخفض مقدار القوة إلى ربعه، وإذا أصبحت المسافة ثلاثة أمثالها انخفض مقدار القوة إلى تسعه، وهكذا. ونستطيع أن نقول إن القوة تتناسب عكساً مع مربع المسافة (قانون التربيع العكسي). وهنا نلاحظ بالاستناد إلى هذه العلاقة، أن القوة الثقالية تضعف كلما زيدت المسافة، ولكنها لا تهبط أبداً إلى الصفر، لذلك، لم تعد الفكرة القائلة أنه يمكن لجسم أن يفلت من الجذب الثقالي لجسم آخر (من جذب الأرض الثقالي مثلاً) فكرة صحيحة.

ولكي يُظهر نيوتن في قانونه ارتباط القوة بالكتلة، افترض أن القوة تنشأ عن الكتلة، ولذلك صار لا بد أن ترتبط شدة القوة بين الجسيمين تناظرياً بكتلتيهما، وإلا لما تساوى الفعل ورد الفعل ولما تعاكسا. والتركيب الجبري الوحيد عندئذ الذي يدل على التناظر الصحيح هو جداء الكتلتين $m_2\ m_1$.

وهكذا توصل نيوتن إلى قانونه في الثقالة، فقد وفق بين العبارة السابقة وارتباط القوة بالمسافة، فأصبح قانون قوة الثقالة (التي أشير إليها بالحرف F) على الصورة التالية:

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

لقد درسنا منذ قليل جانبي الكتلة والمسافة في هذه الصيغة، ولكن ماذا بشأن هذا المعامل G؟ ومن أين أتى؟ إنه في الحقيقة ثابت أساسي بكل معنى الكلمة، ويدعى «ثابت نيوتن الكوني للثقالة»، فلولاه لأصبحت الصيغة السابقة خطأ بمعنيين، بمعنى أنها كانت ستعطينا قيمة كبيرة جداً لشدة القوة الثقالية، وبمعنى آخر هو أنها كانت ستصبح مختلفة الأبعاد، أي أن تركيبة العناصر المكونة لها (المكان والزمان والكتلة) تصبح غير صحيحة؛ فقد رأينا أن القوة، بحسب قانون نيوتن الثاني في الحركة تساوي جداء الكتلة في التسارع، وأن التسارع يساوي المسافة على مربع الزمن، فالقوة هي جداء كتلة في مسافة مقسوماً على مربع الزمن. ولكن صيغة نيوتن بدون G تعطي القوة F على صورة جداء كتلة في كتلة على مربع مسافة، فهي ليست صيغة قوة. ولكي يجعل نيوتن تركيبة القوة تركيبة صحيحة، ضربها بالثابت G، كي يكون لهذا الثابت التركيبة المناسبة من المكان ـــ الزمان ـــ الكتلة، التي تعطي صيغة نيوتن التامة مركباتها الصحيحة من المكان ـــ الزمان والكتلة وتصبح قوة. وهكذا حصل نيوتن على الأبعاد الصحيحة المعبَّر عنها بالكيانات الفيزيائية الأساسية. فكانت تركيبة G (المناسبة) من المكان ـــ الزمان ـــ الكتلة هي مكعب مسافة على جداء كتلة في مربع زمن. ويعبر عن G بطريقة أخرى كما يلي: سم^3 / غ . ثا^2، وقيمتها العددية هي $6,668 \times 10^{-8}$ سم^3 / غ . ثا^2 (وكان هـ. كافندش H.Cavendish هو أول من قاسها بعد نحو قرن ونصف من اكتشاف نيوتن لقانون التربيع العكسي).

ولقد أدى ظهور قانون نيوتن في الثقالة وقانونه الثاني في الحركة إلى تقدم علم الفلك من علم يخطىء مرة ويصيب أخرى إلى علم رياضي دقيق، لا سيما دراسته لمدارات الكواكب، هذه الدراسة التي تطورت إلى ما سمي «الميكانيك السماوي» وهو أحد أعظم إنجازات العقل البشري وأجملها. إن قانون نيوتن للثقالة بالإضافة إلى قوانينه في الحركة، سرعان ما تتضح قدرتها على حل المسائل الناشئة عن التأثيرات الثقالية المتبادلة بين الأجسام عندما تستخدم هذه القوانين في تعيين مدارات الكواكب حول الشمس، إذ إن ما أدت إليه جهود براهه وكبلر المشتركة من اكتشاف اختباري حسي لطبيعة مدارات الكواكب (أو قوانين كبلر الثلاثة في حركة الكواكب)، يمثل مجهود إنسان لمدة ستين سنة، في حين أن الإنسان يستطيع أن يتوصل بقوانين نيوتن إلى الهدف نفسه في غضون ساعة واحدة لا أكثر، وإن دل هذا الفرق على شيء فإنما يدل على قوة التنبؤ التي تتجلى في تضافر القانون الصحيح مع المنطق السليم (الرياضيات).

ولقد أثبت نيوتن بعد ذلك قوة قانونه بأن أعطى التفسير الصحيح لظاهرة المد والجذر على أنها ناشئة عن جذب القمر والشمس التثاقلي لمحيطات الأرض وبحيراتها وأنهارها. وقد بين أن تغيرات الجذب الثقالي تتناسب عكسياً مع مكعب المسافة*، لأن الجذب المدي يعطي بالفرق بين الجذب

---

* المقصود بذلك فعلاً هو أن اختلاف جاذبية الشمس (أو القمر) لوحدة الكتل في نقطتين من الأرض يتناسب عكسياً مع مكعب المسافة.

(في وحدة الكتل) على كتل الماء في الأرض، والجذب في وحدة الكتل على الأرض بأكملها. ولما كان القمر أقرب إلى الأرض بنحو 400 مرة من الشمس، فجذبه المدي يقرب من مثليْ جذب الشمس على الرغم من أن الجذب الكلي للشمس على الأرض بأكملها يقرب من 180 ضعفاً من جذب القمر.

ولقد حقق نيوتن اكتشافات علمية هامة عبر قوانينه في الحركة والتثاقل التي اكتسب بها معظم شهرته، منها بوجه خاص، عمله في البصريات الذي يستحق الذكر لأهميته التطبيقية والنظرية، إذ قام نيوتن بأول خطوة عظيمة في دراسة طبيعة الضوء وكيفية انتشاره، في حين لم يكن يُعرف عن ذلك سوى القليل من قبل. فكبلر، مثلاً، اكتفى بتطوير دراسة الكواسر الضوئية وبيَّن كيف تتكون الأخيلة بالعدسات، وصنع غاليليو مرقابه، في حين شرح نيوتن طبيعة الضوء بأن بيّن أنه إذا مُررت حزمة من الضوء الأبيض عبر موشور، فإنها تتوزع بعد بروزها على صورة شريط من الألوان (طيف الضوء) التي تتدرج من الأحمر إلى البنفسجي، وبرهن بذلك على أن الضوء الأبيض هو خليط من أضواء ذات ألوان مختلفة. وقد دعّم استنتاجه هذا بأن بيَّن أنه إذا وجِّه الحزمة الملوّنة بعد بروزها من الموشور نحوَ موشور آخر مماثل تماماً للأول، فإن الحزمة الملونة لا تتباعد ألوانها على شكل مروحي كما حدث لحزمة الضوء الأبيض بل تظل على حالها كما كانت قبل دخولها في الموشور الثاني، وهذا يعني أنِ الألوان في الحزمة البيضاء لا في الموشور. كما بين نيوتن أنه إذا مرت حزمة الأضواء الملونة كلها البارزة من الموشور الأول في موشور آخر مماثل له تماماً لكنه مقلوب بالنسبة إليه، فإن الحزمة البيضاء تعود إلى الظهور؛ وبذلك بين أن الموشور الثاني يقلب فعل الموشور الأول ويعيد دمج الألوان. وقد أثبت نيوتن بهذه التجربة أيضاً خاصة مهمة جداً في انتشار الضوء وهي عكوسية الضوء، أو بعبارة أخرى، إذا قُلب اتجاه حزمة ضوئية تمر عبر وسط معين أو عبر سلسلة من الأوساط (كالهواء والماء والزجاج) وفي أي نقطة من مسارها، فإن الحزمة تعيد رسم مسارها في الاتجاه المعاكس. وهذه خاصة مهمة جداً في الطبيعة، نظراً لندرة حدوثها بوجه عام. فلولا حدوثها بهذه المناسبة، لما أثارت بعض المسائل الهامة عن قوانين الطبيعة بمجملها؛ لأن الدلائل أخذت تشير عندئذ إلى أن العكوسية شائعة في الطبيعة، حكمها حكم اللاعكوسية. وقد أجرى نيوتن أيضاً تجاربَ على العدسات والمرايا وبين أن المرآة الكروية المقعرة (التي نحتها بنفسه من زجاج جديد وصقلها) تكوِّن صورة مماثلة تماماً للصورة التي تكوّنها العدسة، ولكنها خالية من الزيغ اللوني المزعج (بصورة حافة محيطية ملونة) الذي يظهر في الصورة التي تكونها العدسة. وقد عزا نيوتن زيغ العدسة بحق إلى شكلها الموشوري الرقيق، الذي تتخذه عند الانتقال من مركزها إلى طرفها، وأشار إلى أن استخدام مقراب ذي مرآة مقعرة (عاكس) يعطي، لعدم وجود زيغ لوني فيه، صوراً محددة أوضح من التي يعطيها مقراب ذو عدسة (كاسر)، وقد أسفر هذا عن تغير كبير جداً في استخدام المقاريب الفلكية الضخمة التي لولاها لما تحقق العديد من أبرز الاكتشافات الكونية التي

عقبت نيوتن .

لقد أثارت طبيعة الضوء ، وكيفية انتشاره ، دهشة دارسي الظواهر الطبيعية منذ أيام أرخميدس ودفعتهم إلى التأمل فيها . وقد بذل غاليليو جهده عبثاً لقياس سرعة الضوء ، كما تمعن كبلر كثيراً في طبيعته ، ولكن نيوتن كان أول من قدم نظرية واضحةً عن انتشاره ، إذ لاحظ أنه إذا سلط حزمةً ضوئية على حاجز معتم له أطراف حادة جداً ، فإن ظله ، الملقى على حائط أبيض قريب منه ، يبدو واضحاً محدداً كالحاجز نفسه ، فبدا له أن الحزمة لا ينحرف منها شيء أبداً عند حافة الحاجز وإلا لبدا ذلك على حواف الظل لو أن الضوء ينتشر انتشار الأمواج . وهكذا اعتقد نيوتن أن هذه النتيجة تعني أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة ويتجاوز الحواف الحادة بدلاً من أن ينعرج عندها كما يجب أن تفعل الأمواج (أي أن سلوكه يخالف سلوك موجة صوتية أو مائية) . ولذلك استنتج نيوتن أن الضوء يتألف من جسيمات ، وأن هذه الجسيمات يجب أن تسير ، بحسب قانونه الأول في الحركة ، في خطوط مستقيمة ، طالما أن حافة الحاجز لا تؤثر فيها بأية قوة . وكان استنتاجه هذا بداية ولادة نظرية نيوتن الجسيمية في الضوء التي أُهملت بعد ذلك لصالح النظرية الموجية ، إذ أثبتت مشاهدات أكثر دقة أن حافة ظل الحاجز ليست واضحة بل مشوشة ، مما دل على أن الحزمة قد انعرجت حول الطرف الحاد . أضف إلى ذلك أن نظرية نيوتن الجسيمية في الضوء تقتضي أن تكون سرعة الضوء في وسط كثيف كالزجاج أو الماء ، أكبر من سرعته في وسط خفيف كالهواء أو في الفراغ ، وهذا يخالف الحقائق التجريبية الواضحة .

على أن نيوتن عرض في كتابه ، ابصريات Opticks ، سلسلة من المسائل الهامة التي تُظهر إلى أي مدى عميق كان معنياً بالضوء . وكان آخر هذه المسائل مقولته بأن الضوء والمادة يمكن أن يتحول أحدهما إلى الآخر في بعض الظروف ؛ وإن دل هذا على شيء فإنه يدل على أن تخمين نيوتن كان صحيحاً ولكنه لا يعني أنه كان لديه أدنى فكرة عن نظرية النسبية .

وعلى الرغم من أن نيوتن كان متربعاً على عرش الفيزياء منذ أواخر القرن السابع عشر حتى بدايات القرن الثامن عشر ، فإن هذا لا يعني أنه لم يكن هناك علماء لامعون حققوا في تلك الفترة مساهمات جوهرية ، حتى أن بعضهم تحدى بعنف أفكار نيوتن . وكان من أهم علماء هذه الجماعة التي عاصرت نيوتن : روبرت هوك و ر . بويل Robert Boyle و ك . هويغنز Ch.Huygens ، و أ . رومر Ole Roemer و ج . برادلي James Bradley و إ . هالي E.Halley ؛ فلا بد لنا من دراسة ، ولو بسيطة ، لأهم مساهمات هؤلاء الرجال المرموقين وإلا كانت قصتنا ناقصة .

كان هوك (1635 - 1703) مثل زميله نيوتن طفلاً عليلاً يشكو من آلام في الرأس معظم أيام طفولته . وكان والده رجل دين بسيطاً يعمل في أبرشية صغيرة في جزيرة وايت Wight ، لذلك تلقى هوك تعليمه الأول من والده . ثم منعه سوء صحته من متابعة الدراسة لسنوات عدة ، ولكنه أظهر مع

ذلك اهتماماً بالفن، فأرسله ذووه في عام 1648 إلى لندن ليعمل تلميذاً متدرباً عند الرسام ب. ليلي Peter Lely ولكنه سرعان ما تخلى عن مهنة الرسم ومساعيه لأجلها والتحق بمدرسة وِسْتمنستر حيث برز في الدراسات الكلاسيكية والرياضيات، كما أنه واظب على جامعة أكسفورد لمدة عامين قبل أن يقدمه أستاذه في الكيميائيات ت. ويليس T.Willis إلى روبرت بويْل الذي كان قد وصل حديثاً إلى أكسفورد والذي كان يبحث عن معاون يساعده في تحسين مفرغة الهواء التي ابتكرها.

أمضى هوك قرابة عشر سنوات مع بويل، وهو يشحذ مهاراته التجريبية والميكانيكية. وفي عام 1662 قبل بوظيفة قيّم مختبر في الجمعية الملكية (لأنها كانت الوظيفة الوحيدة المأجورة في الجمعية في ذلك الزمن)، وقام بأعباء واجباته على خير ما يرام، فكان يحضِّر ثلاث أو أربع تجارب قيِّمة، قبل كل اجتماع أسبوعي تعقده الجمعية. «فكانت تلك فرصة طيبة لخيال هوك الخصب كي ينفذ واجباته بمهارة فائقة لعدة سنوات»[1]. وفي عام 1664، عين هوك أستاذاً للهندسة في كلية غريشام Grecham بدلاً من إسحق بارو الذي تخلى عن هذه الوظيفة ليصبح أول أستاذ لوكاني Lucanian للرياضيات في جامعة كمبردج. وفي عام 1665 نشر هوك، على الرّغم من كل أعبائه في الجمعية كتابه مكروغرافيا Micrographia الذي «لا يقتصر على تمثيل نتائج بحوثه الأولى وملاحظاته عند استخدام المجهر الذي كان قد صنعه، بل كان يحوي أيضاً عدداً من الرسوم التوضيحية الجميلة التي أكدت بعد ذلك موهبته الفذة في رسم المخططات»[2] فانضافت بذلك رسوم هوك التوضيحية المفصلة إلى نثر الكتاب السلس، مما جعله أكثر الكتب رواجاً في إنكلترا، وساهم في شهرة هوك العلمية. ثم استخدم هوك مهارته في رسم المخططات ليرسم مخططاً لإعادة بناء لندن بعد الحريق الكبير الذي دمرها. ومع أن المشروع لم يلق القبول أبداً، إلا أنه لفت انتباه السير ك. فرن Ch. Wren، وأصبح الاثنان بعد ذلك صديقين حميمين.

وفي عام 1677، انتخب هوك أميناً للجمعية الملكية، بعد وفاة هنري أولندبرغ الذي كان هوك يظن أنه الرجل الذي حاول أن يسرق منه اختراعه لميقاتية تعمل بالنابض المشدود. ولكن تولي هوك منصب الأمانة لم يتميز بنشاط خاص لأن فكره الخصب كان يتلاءم مع تحليل الظواهر الطبيعية أكثر مما يتلاءم مع المناقشات التأملية بين أعضاء الجمعية، ومع ذلك لم يتخل أبداً عن واجباته الأكاديمية المنهكة، حتى عام 1683، حين تخلى عن منصب الأمانة، واحتفظ بمنصب القيّم.

وكان هوك، على الرّغم من ابتلائه بسوء صحته في معظم أيام حياته عالماً مجدداً، وربما كان عيبه الكبير نفاذ صبره الذي منعه من تطوير العديد من أفكاره وابتكاراته تطويراً يتعدى صورها البدائية، ولكنه لم يظهر مثل نيوتن، أنه يحمل ضغينة لأحد أو نفوراً من المعارضة. ومع ذلك، ساقه سوء طالعه إلى خلاف مع نيوتن فيما يتصل بالأمور الأساسية في البصريات وفي الميكانيك السماوي، وامتنع نيوتن نتيجة لذلك عن الاعتراف بمساهمات هوك الجوهرية في دراسة الضوء، كما

أخر نشر كتابه البصريات مدة جيلين إلى ما بعد وفاة هوك عام 1703 .

ويأتي هوك في المرتبة الثانية بعد نيوتن بكونه أحد علماء ذلك العصر الأكثر إنتاجاً وابتكاراً ؛ فكان يقضي ساعات عديدة يومياً في السير ، تاركاً لخواطره غير الناضجة أن تبدع كل نوع من الحيل الآلية ، وتنجز العديد من التجارب ، وتطور نظريات وهمية من مختلف الأنواع . ولم يكن ينام إلاّ ثلاث أو أربع ساعات في الليل . وقد صنع عدداً من مفرغات الهواء المتقنة التي استخدمها بويل في تجاربه على الغازات ، كما ابتكر أو حسّن عدداً من الأدوات العلمية ، بما فيها أدوات تسديد مقرابه ولوالبُ إحكام دقيقة وحاضنة (ركوبة) مقراب تحركها ساعة ميقاتية وساعات تعمل بنابض مشدود ، ووصلة جامعة (عامة الحركة) والحظار الحدقي الذي يزيد من شدة وضوح الأخيلة الضوئية .

وفي مجال الفيزياء النظرية ، اقترح هوك نظرية موجية غير مكتملة تكون فيها اهتزازات الموجة عمودية على منحى انتشار الضوء ، وكان يجادل في أن حركات الكواكب يجب أن تعالج على أنها ظواهر ميكانيكية ، واقترح لها نظرية في الثقالة غير صحيحة لكي يفسر حركاتها . كما كان أول من اقترح نظرية حركية للمادة ، وألح على أن الأجسام كلها تتألف من جسيمات غير مرئية تستمر في حركتها الاهتزازية ، وأن كل نوع من أنواع الجسيمات قادر على الاهتزاز على طريقته الخاصة لا يغيرها ، مما يذكرنا بصورة الإلكترونات الراهنة وكيف أن لها حالاتها الخاصة من الطاقة في داخل الذرة .

ولكن هوك ، على الرغم من اختراعاته وخواطره ، اشتهر بقانونه في المرونة فحسب ، وهو قانون كان من بعض النواحي بداية لفيزياء الجسم الصلب وأساس الهندسة الميكانيكية ، وهو يعرف باسم « قانون هوك » ، وينص على أن تمدد الجسم الصلب (أو استطالته) ، ضمن حد مرونته ، بفعل قوة (أو توتر) يتناسب مع هذه القوة المؤثرة فيه (الاستطالة متناسبة مع التوتر) . ونعني بقولنا « حد المرونة » ، الاستطالة القصوى التي إذا تجاوزها الجسم الصلب في استطالته لن يعود إلى حالته الأصلية بعد زوال التوتر (أي القوة المؤثرة فيه) . ويشير هذا القانون إلى أن باستطاعتنا استخدام الجسم الصلب لوضع وحدة قوة (إذ يمكن أن يتم الاتفاق على وحدة هي القوة اللازمة لإحداث استطالة معينة) . ولكي نقيس بعدئذ مقدار قوة ما ، نقارن الاستطالة التي تُحدثها هذه القوة بالاستطالة التي تُحدثها وحدة القوة .

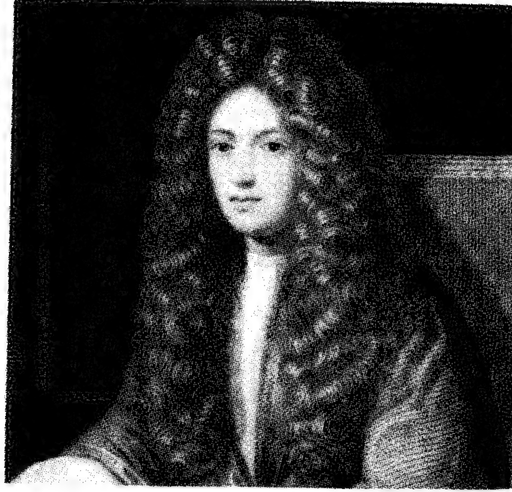
كان شريك هوك العلمي وصديق عمره روبرت بويل (1627-1691) ، وهو أحد أربعة عشر ولداً ، وُلدوا لمحامٍ تخرج من جامعة كمبردج ، وغادر إنكلترا إلى إيرلندا ، وهناك كون ثروته الكبيرة ، فنشأ روبرت في كنف أسرته على ممتلكاتها في ليسمور في مقاطعة منْستر . وتلقى تعليمه على أيدي معلمين خصوصيين حتى بلغ الثامنة من عمره ، وعندئذ أرسله والده إلى كلية إيتون . وقد أمضى روبرت أربع سنوات في إيتون قبل أن ينتقل مع أخيه إلى جنيف في سويسرا ليتلقى تعليمه ؛

ومع أنه تلقى تعليماً كافياً، إلا أنه تأثر تأثراً أشد عمقاً بعاصفة كهربائية هوجاء حدثت هناك وأقنعته بأن عليه أن يستخدم مواهبه العقلية في إعلاء شأن المسيحية على الأرض.

وفي عام 1644، عاد بويل إلى لندن، وهناك تأثر بعدد من الفلاسفة الطوباويين الذين كانوا يعتقدون بأن التجارب هي أفضل طريقة للكشف عن أسرار الطبيعة، فتزود بويل عن طريق هذه الفلسفة العلمية البيكونية بالاتجاه الذي كان يحتاجه، واستقر في ممتلكات الأسرة في ستالبردج في مقاطعة دوستْشر حيث بدأ يقضي كل وقته في دراسة العلم واللاهوت. وكان اهتمامه منصباً على الكيمياء أكثر من غيرها، وسرعان ما أصبح ضليعا في هذا الموضوع حتى أن جون ولكنز John Wilkins، مدير كلية وادهام Wadham طلب منه أن يأتي إلى أكسفورد. وقد وجد فيه بويل الشقيق الروحي، لأن ولكنز كان مجرباً متمكناً عرف، وهو المتدين بعمق، معايب الفلسفة العلمية اللاهوتية الضيقة.

وقد بدأ بويل بعد مجيئه إلى أكسفورد في صيف عام 1654، بإجراء تجارب في خواص الجو قادته بعد ذلك إلى القانون الذي سُمي باسمه. وكان حافزه إلى الاهتمام بهذا الموضوع، هو تجارب غيريك Guericke في ألمانيا، الذي بيّن «أنه إذا أطبقت قاعدتا نصفي كرة معدنية مجوفين ليكوّنا كُرة كاملة ثم أُفرغت هذه الكرة من الهواء، فإن الضغط الجوي يمسك بهذين النصفين معاً بشدة كبيرة تقاوم قوة مجموعتين من ستة خيول، تشد كل منهما نصف كرة في اتجاهين متعاكسين»[3]، وقد اعتقد بويل أن بالإمكان صنع مفرغة جيدة، ولكن افتقاره للمهارات الميكانيكية المطلوبة جعله يقرر أنه بحاجة لمعاون يستطيع أن يصنع الآلة فعلاً، ولذلك عين، بناء على نصيحة أحد مساعدي ولكنز، روبرت هوك معاوناً له، وكان آنذاك طالباً مغموراً في أكسفورد. وهكذا بدأ بويل وهوك مشاركة ناجحة استمرت حتى وفاة بويل، وكان هذا من حسن حظ هوك، إذ من المشكوك فيه أنه كان يستطيع لولا ذلك أن يشحذ مهاراته العلمية بهذه السرعة. ومهما يكن من أمر، فقد أجرى الثنائي سلسلة من التجارب قادت بويل إلى استنتاجه بأن الهواء غير متجانس كيمياوياً، ولكنه يحوي «جوهراً حيوياً ضرورياً للحياة مع أن معظمه لا يفيد في أي غرض» وأن لهذا الهواء وزناً. كما أدت هذه النظرات العميقة ببويل إلى أن يستنتج بأن الجو القريب من الأرض مضغوط وأن ضغطه يكفي لحمل 29 بوصة (نحو 74 سم) من عمود الزئبق في أنبوب شاقولي مُلِيء أولاً بالزئبق ثم غُمر من طرفه المفتوح في حوض مليء بالزئبق أيضاً.

لقد اشتهر بويل أكثر ما اشتهر بقانونه في الغازات الذي ينص على أن الغاز إذا كانت درجة حرارته ثابتة فإن جداء حجمه بضغطه يظل ثابتاً. ولكي نفهم هذا القانون البسيط، الذي سنبحثه بتفصيل أكثر في الفصل الحادي عشر، علينا أن نعبر عن الضغط أو نعرّفه بدلالة مفاهيمنا الأساسية المكان ــ الزمان ــ القوة، ومن أجل ذلك، نلاحظ أن تأثير القوة يختلف بحسب ما يكون



روبرت بويل (1627 - 1691)

توزعه على مساحة واسعة، أو أنه يتركز على مساحة صغيرة، إذ يشتد هذا التأثير كلما صغرت المساحة. فنحن نشعر، نتيجة لذلك، بألم حاد حين تضغط قوة على جلدنا بدبوس، في حين نجد هذه القوة نفسها مزعجة فحسب فيما لو ضغطت على جلدنا بشيء عريض. كما أننا نستطيع السير بسهولة على الثلج إذا استخدمنا أحذية الثلج الخاصة (الزحاليق)، في حين لو سرنا على هذا الثلج بأحذيتنا العادية لغصنا فيه. فالجسم الصلب، بسبب ثقله (وهو قوة)، لا يؤثر بضغطه إلا على الجزء الذي يلامسه من السطح الذي يستند إليه. والمقدار الفيزيائي الفعال في أمثلة كهذه هو الضغط الذي يعرّف بأنه القوة المؤثرة في وحدة المساحة. ويعبّر عنه بالدينة لكل سنتيمتر مربع (دينة / سم^2) أو بالرطل لكل بوصة مربعة. ويؤثر السائل (كالماء مثلاً في إناء أو خزان) بضغط على قعر الوعاء الذي يحويه وعلى جوانبه. ويقوى هذا الضغط على الجوانب وداخل السائل كلما ازداد العمق، أي أن الضغط يكون واحداً في جميع النقاط الواقعة على عمق واحد. أما الغاز فيمارس ضغطاً على جميع نقاط وعائه. وإذا كان حجم الوعاء صغيراً (إذا قورن بضغط الجو)، فإنه يمكن افتراض أن الضغط داخل الغاز هو نفسه في جميع نقاطه، وما يقال عن الضغط في نقطة من نقاط غاز هو نفس ما قيل من قبل عن الضغط في نقطةٍ من سائل، على أن ثمة ميزة مهمة في حالة الغاز، وهي أنه إذا ضُغط الغاز بقوة ما في نقطة من نقاطه، فإن هذا الضغط ينتقل بالتساوي إلى جميع النقاط في الغاز. ثم إن ضغط الغاز في أي نقطة من جوانب حاوية يكون عمودياً على هذا الجانب في تلك النقطة.

والآن ، بعد أن فهمنا خواص الضغط ، نستطيع أن ندرس قانون بويل دراسة مجدية . فلنفرض أن لدينا غازاً داخل أسطوانة في أعلاها مكبس عديم الوزن مساحته وحدة المساحات ، (1 سم^2 مثلاً) ويمكن أن يتحرك بدفعه إلى أسفل لزيادة ضغط الغاز أو إلى أعلى لتخفيفه . فإذا لم توضع على المكبس أوزان ، بقي ساكناً على ارتفاع معين ، فيكون ضغط الغاز حينئذ مساوياً تماماً للضغط الجوي . وإذا وُضع فوق المكبس ثقل W ، فإن المكبس يهبط في الأسطوانة فيزداد ضغط الغاز إلى أن يصبح مساوياً مجموع الضغط الجوي والثقل W . وحالما يزداد ضغط الغاز ينقص حجمه ، وإذا زدنا W زيادة تكفي لجعل ضغط الغاز الكلي مساوياً مثلي الضغط الجوي ، فإن حجم الغاز ينقص إلى نصف ما كان عليه في البدء (أي حين لم يكن هناك وزن على المكبس) . ويمكن التعبير عن هذه العلاقة بقولنا إن جداء الضغط في الحجم يساوي مقداراً ثابتاً ، ويظل هذا القول صحيحاً ما دامت درجة حرارة الغاز ثابتة لم تتغير .

وقد انتهت مشاركة بويل المثمرة مع هوك مؤقتاً حينما أصبح هوك قيّماً للجمعية الملكية عام 1662 . ومع ذلك استمر بويل في إجراء تجاربه الجوية حتى عام 1668 ، ثم انتقل بعدئذ إلى لندن حيث عاش مع أخته في منطقة بول مول Pall-Mall * وقد أصبح هو أيضاً مهتماً بتطوير نظرية ذرية للمادة ، كما عني مثل نيوتن بالأمور الصوفية الباطنية ، وأجرى تجارب مطولة على تحويل المعادن . ويبدو أن نيوتن كان متأثراً في حقيقة الأمر بروايات بويل عن محاولاته في تحويل المعادن الخسيسة إلى ذهب أكثر من تأثره بأعماله في مجال الضغط الجوي ، على أن بويل كان عالماً عصرياً بكل معنى الكلمة في طريقة تسييره لبحوثه ، فبدلاً من أن ينجز هو نفسه كافة الأعمال ، كان يعطي تعليماته إلى معاونيه الذين كانوا يقومون بمعظم العمل التجريبي الممل ، وكان يكتفي هو بوضع المشرف الذي كانت تمليه عليه التقاليد الاجتماعية (إذ كان يُظن أنه من غير الملائم على سيد ملاك له مكانته الاجتماعية أن ينخرط في مثل هذا الجهد العضلي) ، كما أن صحته العليلة كانت تملي عليه ذلك .

كان بويل يشكو طيلة حياته من حصوات الكلى ، فكان هذا الوضع سبباً في أن يصبح مصاباً بوسواس المرض ، فكان يتعاطى أنواعاً مختلفة من الأدوية الغريبة التي ربما كانت تؤذيه أكثر مما تفيده : «وكان نظام حياته يقوم على اتباع حمية قاسية ، فلم يتناول أبداً طعاماً للمتعة ، وإنما للمحافظة على حياته»[4] . وقد أصبحت أفكاره في أواخر حياته أكثر توجهاً نحو الأمور الدينية ، وكتب عدداً من المقالات اللاهوتية ، ولكن تيسر له الوقت كذلك ليتمم أيضاً كتابة مقالة في تاريخ الهواء العام . وقد توفي في فراشه وهو يصحح تجارب طبع هذا الكتاب .

وكان كريستيان هويْغنز (1629-1695) مثل بويل مجرباً يُعتمد عليه ، غادر حياة اليسار والدعة

---

* قرب ساحة الطرف الأغر .

لينصرف إلى عالم المختبر الأقرب إلى عالم الواقع، فوالده كونستنتان هويْغنز كان دبلوماسياً وشاعراً وشخصية رائعة في تاريخ الأدب الهولندي كما كان عضواً بارزاً في مجلس الدولة. وبعد وفاة والدة كريستيان في عام 1637 انتقلت العائلة إلى مدينة قريبة من لاهاغ (فرنسا) La Hague، وكان من بين زوار أسرة هويغنز العديدين، الفيلسوف الفرنسي رينيه ديكارت الذي ترك تصوره الهندسي للمكان أثراً عظيماً في تطور الرياضيات والفلسفة الطبيعية. وقد أدى تعلق هويغنز بالرياضيات إلى تفضيله كتاب المبادئ Prancipia لنيوتن على مؤلفات أرسطو، فنشر عدداً من الأعمال الرياضية التي وطدت أركان شهرته في أوربة قبل أن يبلغ الثلاثين من عمره.

وفي أثناء هذه المرحلة نفسها، أدخل هويغنز تحسينات هامة على المقراب، ودرس ظواهر الانعكاس والانكسار كما نحت عدسات قليلة العيوب. وقد اكتشف بهذه الأدوات حلقات زحل بالإضافة إلى قمره السادس تيتان. وفي عام 1657 صنع هويغنز أيضاً ميقاتية ذات رقاص تأمل أن تستخدم في تعيين خط الطول في البحر، ولكن براعته في تصميمه عادلها عدم قدرته على إعطاء قراءة دقيقة على ظهر المركب في أثناء حركته.وقد ظل هويغنز مدة سنوات وهو يحاول من دون طائل إصلاح آلة ذات رقاص فلم يستطع أبداً أن يصحح عيوبها الأساسية على الرّغم من أن ميقاتيات أفضل منها ابتُكرت حالاً بعد اختراعه.

وفي عام 1661، زار هويغنز لندن ليلتقي بعدد من مؤسسي الجمعية الملكية، وبعد ذلك بعامين، كرمه لويس الرابع عشر ملك فرنسا بسبب ميقاتية الرقاص التي ابتكرها، وفي عام 1666 تأسست أكاديمية العلوم في فرنسا، وطلب كولبير، وزير الملك، من هويْغنز أن يقوم بإدارة نشاطها، فوافق على ذلك هويغنز، ولكنه شعر بالحاجة إلى بعض التوجيهات الإدارية، وبدأ يتصل بهنري أولدنبرغ، أول أمين للجميعة الملكية، فساعدت اتصالاته على نشر بذور التقدم العلمي الذي تحقق آنذاك عبر أوربة كلها. وقد نشر هويغنز نفسه عدداً من الأعمال عن القوة النابذة، كما أن أفكاره عما أصبح يعرف فيما بعد باسم «قانون نيوتن الثاني» في الحركة، سبقت كما يبدو تصور نيوتن لهذه الفكرة، إذ ظهرت معالجة هويغنز لهذا الموضوع في عام 1673، و« كانت تتضمن، إلى جانب دراساته المتعلقة بالرقاص ودور اهتزازه، ونظرية منشيء (منشور) منحن (أي المحل الهندسي لمراكز تقوس هذا المنحني)، والسكلوئيد بوصفه منشيء نفسه* ونظريات عن تركيب القوى في الحركة الدائرية وفكرة عامة عن حفظ الطاقة»[5].

وقد وضع هويغنز نظرية موجية للضوء حلت محل نظرية نيوتن الجسيمية في النهاية لأنها

---

* السكلوئيد هو المنحني الذي ترسمه نقطة من دائرة (دولاب سيارة مثلاً) عندما تتدحرج على مستقيم من دون انزلاق. ومنشيء السكلوئيد أو منشوره هو سكلوئيد يساويه.



كريستيان هويْغنز (1629-1695)

كانت تفسّر جميع الظواهر والخواص الضوئية المعروفة في ذلك الحين والتي لم تستطع نظرية نيوتن تفسيرها. ونخص بالذكر من تلك الخواص ما بينه هويغنز من أن النظرية الموجية تقتضي أن يكون سير الضوء في وسط كثيف أبطأ من سيره في وسط مخلخل (الماء مقابل الهواء مثلاً)، وهذا يعارض نظرية نيوتن الجسيمية التي تقتضي أن يكون سير الضوء بحسبها في الوسط الكثيف أسرع من سيره في الوسط المخلخل. وقد أدخل هويغنز فكرة جبهة (صدر) الموجة لكي يفسر انتشار الضوء في خطوط مستقيمة، وتصور هذه الجبهة على أنها سطح كروي يتقدم بسرعة الضوء بدءاً من المنبع النقطي، وكلما تقدمت جبهة الموجة الكروية هذه، كبر حجمها ونقصت شدة الضوء في كل نقطة من سطحها. وكان هويغنز متأثراً على الأرجح في تفكيره هذا بالطريقة التي تتقدم فيها الأمواج على سطح ماء بركة هادئة حين يُرمى فيها حجر صغير أو حصاة، إذ تلحق كل موجة بأخرى وعلى مسافة معينة منها، ويبدو الأمر كأن كل موجة متقدمة تدفعها إلى الأمام موجة خلفها. أضف إلى ذلك أنه إذا اصطدمت موجة متقدمة بحاجزين موضوعين في الماء تفصل بينهما فجوة صغيرة، فإن موجات جديدة تتحرك منطلقة من الفجوة كما لو أن حصاة أُلقيت في الماء عند الفجوة نفسها. ولكي يفسّر هويغنز هذه الظاهرة، فكّر بأن كل نقطة من الموجة هي مصدرٌ لمويجات جديدة صغيرة

وثانوية تتحرك مبتعدة عن الموجة القديمة لتكوّن موجة جديدة مثلما هو واضح من الظاهرة الموصوفة أعلاه. ولكن الحاجزين يحطمان جميع الأمواج ما عدا القطعة الصغيرة التي تدخل من الفجوة، فتولد نقاط هذه القطعة أمواجاً ثانوية جديدة تتقدم في الماء إلى ما وراء الفجوة.

وقد تصور هويغنز، بتحويل أفكاره إلى فكرة جبهة الموجة الكروية المتقدمة للضوء، أن كل نقطة على سطح جبهة كهذه تهتز وتولد جبهات موجية ثانوية صغيرة تندمج بالتالي لتكون جبهة جديدة تسير في طليعة الجبهة القديمة. وكان هذا الإنشاء، الذي تصوره هويغنز، ولا يزال مفيداً جداً في تفسير ظواهر ضوئية عديدة، مثل الانعكاس والانكسار والانعراج والتداخل، التي سوف ندرسها بتفصيل أوسع في الفصل التاسع.

لقد ازدهرت أكاديمية العلوم الفرنسية بقيادة هويغنز غير أن صحته لم تكون بوجه عام جيدة. وكان يصرف قسطاً كبيراً من وقته وجهده في حل النزاع بين الآخذين بالفيزياء الديكارتية والمناوئين لها. وكان هو نفسه يسلم بنظرية ديكارت القائلة بالدوامات، كما كان يعتقد بأن نظرية نيوتن في الثقالة لا يمكن الأخذ بها يقيناً، إذ إنه كان يأبى التسليم بفكرة التأثير عن بعد، بسبب افتقار الآلية المرئية التي يجب أن تتوسط بين الأشياء (لكي تنقل هذا التأثير).

وفي عام 1683 ترافقت وفاة كولبير مع تصاعد الشعور المعادي للغرباء في فرنسا، فدفعت هويغنز إلى مغادرة البلاد إلى إنكلترا، حيث أمضى عدة سنوات كان يحضر في أثنائها اجتماعات الجمعية الملكية ويلتقي أكثر أعضائها شهرة بما فيهم بويل ونيوتن. ولكن نشر كتاب المبادئ عام 1687، الذي وضع مؤلفه نيوتن في مرتبة أعظم علماء أوربة تأثيراً، جعل نظرة هويغنز الديكارتية إلى العالم مهملة غير مقبولة، وصار يعتقد بأنه لم يعد باستطاعته بعد الآن أن يقوم بإسهامات قيمة في العلم، ففقد بالتدريج صلته مع معظم زملائه وعاد إلى هولندا حيث أمضى سنواته الباقية من حياته بعيداً عن التغيرات العظيمة التي أحدثها الميكانيك النيوتني.

لقد أثبتت النظريتان الجسْمية والموجية في الضوء أنهما جديرتان بإثارة اهتمام أول رومر Ole Roemer (1644-1710)، وهو ابن ملاح دانمركي، فقرر دراسة الفلك في جامعة كوبنهاغن، وبعد ذلك طلب منه الفلكي الفرنسي جان بيكار أن يأتي إلى باريس ليعمل مساعداً له، فأمضى رومر معظم وقته يرصد أقمار المشتري، ثم وجد أنه «كان بالإمكان، من الناحية النظرية، التنبؤ بدقة باللحظة التي يخسف فيها المشتري هذه الأقمار (كما تُرى من الأرض)»[6].

كان أعظم إسهام قدمه رومر للفيزياء هو طريقته الفذة في قياس سرعة الضوء، إذ قاس المدة الفاصلة بين خسوفين متتاليين لأحد أقمار المشتري. ولما كانت سرعة الضوء «من أعظم الثوابت أهمية في الطبيعة»، نظراً للدور الحاسم الذي تقوم به في نظرية النسبية، فهي لذلك جديرة بأن

ندرس قياسها بشيء من التفصيل. ولا نعرف بالتحديد متى بدأ العلماء يفكرون في الضوء على أنه كيان فيزيائي يسير بسرعة محدودة؛ فحتى غاليليو، على الرغم من وجهات نظره الفيزيائية الرائعة، قد تصور أن الضوء يجري بسرعة لا نهائية وينتقل آنياً من المنبع إلى الراصد، ولكنه رفض فيما بعد هذه الفكرة الخاطئة واقترح تجربة بدائية غير دقيقة لقياس سرعة الضوء، ولكن محاولته هذه أخفقت. أما نيوتن وهويغنز فقد كانا يعرفان أن الضوء يسير بسرعة محدودة، ولكنهما لم يقدما طريقة لقياسها، لأن الأدوات اللازمة لقياسها بدقة لم تكن قد ابتكرت بعد، ولم تصبح هذه الأدوات صالحة إلا في القرن التاسع عشر عندما استخدم فيزو Fizeau في عام 1849 ميقاتيات دقيقة ودولاباً مسنناً كان يدور بسرعة كبيرة جداً، وأمكنه بذلك قياس سرعة الضوء في الماء، وبين أنها قطعاً أصغر من سرعة الضوء في الهواء، فكانت هذه التجربة هي التجربة الحاسمة التي أدت إلى رفض نظرية نيوتن الجسيمية والتسليم بنظرية هويغنز الموجية.

توصل رومر إلى طريقته في قياس سرعة الضوء عام 1675، عندما لاحظ أن المدة الفاصلة بين خسوفين متتاليين لأي قمر من أقمار المشتري المرئية، تتغير بتغير بعد الأرض عن المشتري أثناء دورانهما حول الشمس، وأن هذه المدة تكون عظمى عندما تكون الأرض أبعد ما يمكن عن المشتري وتكون صغرى عندما تكون الأرض أقرب ما يمكن من المشتري؛ وحين تكون الأرض في الوسط بين هذين الموضعين، تكون المدة الفاصلة (وهي الحقيقية) مساوية نصف مجموع المدتين السابقتين.

ولكي نعرف السبب في ذلك، دعونا نفترض أن سرعة الأرض عند ابتعادها عن المشتري هي ν وأن المدة الحقيقية بين خسوفين متتاليين هي t؛ ففي أثناء هذه المدة تبتعد الأرض عن المشتري مسافة νt، والضوء الآتي إليها والذي ينبىء الراصد بأن خسوفاً آخر قد بدأ، يجب أن يجتاز هذه المسافة الإضافية بسرعته الحقيقية، أي سرعته في الخلاء وهي c، ويتطلب هذا مدة إضافية مقدارها $\frac{\nu t}{c}$، وهذه المدة يجب أن تضاف إلى المدة t لكي نحصل على المدة الفاصلة بالمشاهدة بين خسوفين متتاليين حين تبتعد الأرض عن المشتري. فإذا حدث n خسوفاً في أثناء مدة تباعد الأرض عن المشتري (أي من لحظة أقرب وضع لها من المشتري إلى لحظة أبعد وضع)، يكون التأخر الكلي من أجل هذه الخسوفات هو $\frac{n\nu t}{c}$. وقد وجد رومر أنه يساوي 1000 ثانية. ولكن $n\nu t$ هي المسافة الكلية التي ابتعدت بها الأرض عن المشتري في أثناء هذه الخسوفات n، فهي تساوي نصف الطريق الذي تدوره الأرض في مدارها (ويساوي 186 مليون ميل). فالمدة $\frac{n\nu t}{c}$ هي $\frac{186000000}{c}$ وهي تساوي 1000 ثانية؛ وهذا يعني أن سرعة الضوء c هي 186000 ميل في الثانية، وهو رقم قريب جداً من القياس الدقيق الحالي، المسلم به، وهو $2,9979 \times 10^{10}$ سم/ثا. ولكن هذا الاكتشاف لم يلق الاهتمام الكافي، لأن قياس سرعة الضوء، كان يعد فضولاً علمياً أكثر منه تحديداً لقيمة أساسية هامة. ومع ذلك فقد لقي الدعم من بيكار وهويغنز ونيوتن وادموند هالي E.Halley، بل إن مهارات

رومر الفلكية لم تكن خافية على معظم العلماء، ولفتت أنظارهم على الرغم من لا مبالاتهم باكتشافه، وعينه ملك الدانمارك كريستيان الخامس في عام 1681 في منصب الفلكي الملكي وأستاذاً للفلك في جامعة كوبنهاغن[6]. كما أنه عمل في الخدمات العامة، فأصبح رئيس بلدية كوبنهاغن في عام 1705، وساعد في إصلاح نظام المكاييل والموازين الدانمركية[6].

ولربما كان اكتشاف رومر هذا هو الذي نبه إلى وجود رابطة بين التواتر المشاهد لظاهرة دورية وبين حركة الراصد بالنسبة إليها، أي تلك الرابطة التي أصبحت تعرف بعدما يقرب من 200 عام باسم «مفعول دوبلر» نتيجة لتطبيقها على الضوء من قبل كريستيان دوبلر. كما أن قياس رومر لسرعة الضوء كان أساسياً لاكتشاف ج. برادلي J.Bradley لظاهرة الزيغ الضوئي، فهي أيضاً ظاهرة ترتبط بحركة المراقب بالنسبة إلى مصدر الضوء (أو بالأحرى تنشأ عنها).

ولد برادلي في عام 1693 في مدينة شيربورن Sherborne من مقاطعة غلوسيستر شَر Glaucestershire، وتعلم في أكسفورد وفيها نما عنده اهتمام بالفلك. وقد شجع خاله ج. باوند



جيمس برادلي (1693-1762)

J.Pound ، الذي كان قسّاً وهاوياً للفلك ماهراً ، ميلَ برادلي المتزايد للفلك السماوي ، وقدمه إلى إدموند هالي ، الذي نشأت بينه وبين برادلي صداقة تبين أنها صداقة متينة حين انتخب برادلي في عام 1718 في الجمعية الملكية . وكان برادلي يدعم نفسه مالياً بعمله قساً لبريدستوف عام 1719 . إلا أنه ظل على اهتمامه بالفلك ومتابعته ، ثم تخلى بعد أربع سنوات عن وظيفته بسبب تعيينه أستاذاً للفلك في أكسفورد .

حاول برادلي أن يعين زاوية اختلاف المنظر Parallax إلى النجوم بقياس تغير أوضاع النجوم القريبة الناشىء عن دوران الأرض حول الشمس ، إذ إن كل نجم ثابت قريب من الأرض ، إذا رُصد من نقطتين متقابلتين على مدار الأرض ، تفصل بينهما مدة ستة أشهر ، فإن وضع النجم يتغير بالنسبة إلى النجوم البعيدة جداً . وفي عام 1725 ، حاول برادلي أن يقيس هذا التغير (اختلاف المنظر) ، ولكنه أخفق لأن هذا التغير أصغر بكثير من أن تستطيع وسائل برادلي البدائية المتوافرة في ذلك الوقت أن تقيسه . ويتوقف هذا الانزياح الظاهري (أو الاختلاف الزاوي) على بعد النجم وعلى نصف قطر مدار الأرض (أو نصف المسافة الفاصلة) بين وضعيها اللذين تفصل بينهما مدة ستة أشهر . وكان برادلي يعرف أنه ، بمعرفته نصف القطر هذا ، يستطيع أن يقيس بعد النجم ، إذا أمكنه أن يقيس زاوية اختلاف المنظر . إلا أنه أخفق في محاولته تلك واكتشف عوضاً عنها زيغ الضوء الآتي من النجوم الذي هو أيضاً تغير في وضع النجم . ويتوقف هذا الزيغ على سرعة الأرض وفي سيرها لا على المسافة التي تقطعها ، وهو ينشأ عن تركيب متجه سرعة الراصد مع متجه سرعة الضوء الآتي من الشيء المرصود . (وهناك مثال على هذا التركيب من حياتنا) ، فنحن نستطيع أن نحمي أنفسنا من المطر الساقط شاقولياً ، بإمساك المظلة في وضع قائم تماماً فوق رؤوسنا إذا كنا واقفين ، أما إذا ركضنا تحت المطر فعلينا أن نميل المظلة إلى الأمام بحسب سرعتنا ، وكلما أسرعنا في الركض وجب إمالة المظلة أكثر ، لأن سقوط المطر يبدو لنا كأنه يأتي من الاتجاه المقابل لنا بدلاً من سقوطه شاقولياً . فللحصول على متجه سرعة المطر المشاهد حين نركض ، يجب أن نطرح طرحاً متجهياً متجه سرعتنا إلى الأمام من متجه سرعة المطر الساقط شاقولياً على الأرض .

فإذا طبقنا هذا التحليل على الضوء الآتي من النجم ، وجدنا أن اتجاه النجم ، أو بالأحرى اتجاه الضوء الآتي منه ، يظهر من الأرض مختلفاً عن حقيقته بحسب حركة الأرض حول الشمس . فاتجاه النجم الذي نشاهده من الأرض (وهو اتجاه الضوء الذي يشاهد آتياً من النجم) ، يبدو من الأرض ، في الاتجاه الأمامي لحركتها ، منحرفاً بالنسبة إلى اتجاه النجم الحقيقي . ويتضح هذا الانحراف أكثر ما يتضح في حالة النجوم التي تقع في الاتجاه العمودي على اتجاه حركة الأرض . أما قيمة هذا الانحراف ، الذي يتوقف على سرعة الأرض حول الشمس فحسب لا على بعد النجم وحركته ، فيكون منعدماً في حالة النجوم التي تقع في الاتجاه الموازي لاتجاه حركة الأرض . وينشأ عن هذا الانحراف أن النجوم تبدو كأنها تتحرك في مدارات إهليلجية صغيرة خاصة بها كلما دارت الأرض حول الشمس

دورة كاملة.

وقد حسب برادلي سرعة الأرض العددية على مدارها، اعتماداً على قيمة الزيغ التي قاسها وعلى صيغتها (وهي خارج قسمة سرعة الأرض على سرعة الضوء). وقد استفاد طبعاً في ذلك من قيمة سرعة الضوء التي قاسها رومر، فوجد أن سرعة الأرض تساوي 18,5 ميلاً في الثانية. كما أظهرت قياساته للنجوم تغيرات سنوية في ميل بعضها، واستنتج أنها ليست ناشئة عن الزيغ، وإنما عن حركة خفيفة غير منتظمة لمحور الأرض ناجمة عن تغيرات اتجاه المد الثقالي الذي يحدثه القمر. وهكذا أثبت برادلي لأول مرة في تاريخ العلم أن تحليل سلوك الضوء الآتي من النجوم وخواصه يمكن أن تكشف عن جوانب هامة في ديناميك الأرض.

وقد ساعدت أرصاد برادلي النجمية أيضاً على تأكيد عددٍ من تنبؤات نيوتن الميكانيكية. وفي عام 1742 سُمي برادلي الفلكي الملكي، وبعد ست سنوات منحته الجميعة الملكية مدالية كوبلي Copley Medal، كما شغل عدداً من المناصب الإدارية والمراكز الأكاديمية في غرينويتش. واستمر في ذلك إلى أن عاد إلى بلده الأم غلوسيستر شر قبل وفاته عام 1762 بعدة سنوات.

تعلم صديق برادلي وموجهه الدائم، إدموند هالي (1656-1742) في مدرسة سانت بول في لندن ثم في كلية الملكة، أكسفورد، حيث اجتمع بجون فلامستيد John Flamsteed الذي كان قد سمي مؤخراً الفلكي الملكي في عام 1676، فشجعه فلامستيد على اهتمامه بالفلك، كما حثته مساعي هذا الأخير لتصنيف نجوم نصف الكرة الشمالي، على القيام بعمل مماثل لنجوم نصف الكرة الجنوبي. وحصل هالي بالفعل على الدعم المالي اللازم لرحلته إلى الجنوب من والده ومن الملك شارل الثاني. وفي عام 1676 أبحر إلى جزيرة سنت هيلينا في جنوب المحيط الأطلسي حيث أمضى 14 شهراً سجل في أثنائها أوضاع 341 نجماً، وقام بأرصاد أخرى مختلفة، فأدى تصنيف هالي الذي نشر عام 1678 إلى انتخابه في الجمعية الملكية في هذا العام نفسه.

ولكن هالي اكتسب شهرته من عمله على المذنبات، ولا سيما المذنب الشهير الذي سمي باسمه، والذي اكتشفه عام 1680، وقد كان تنبؤه صحيحاً بأنه سيعود عام 1758، إذ استند في تنبئه إلى تطبيق قوانين كبلر على المذنب الذي ظهر عام 1680 والذي كان مقتنعاً بأن مداره قطع ناقص. ولم يكن هذا الاكتشاف، في الحقيقة، سوى واحد من مساهمات هالي العديدة في العلم. ولكن ربما كانت أعظم خدماته هي نجاحه في إقناع نيوتن بأن ينشر كتابه «المبادئ» الذي كان يحوي معظم اكتشافات نيوتن، وكان أول مبحث عظيم في الفيزياء النظرية، بل يمكن أن يعدّ نشر هذا الكتاب إيذاناً بمعالجة العلم الطبيعي معالجة منهجية وبأسلوب رياضي متين. وكان هالي المحرك الأول في هذه العملية كلها، فهو الذي سأل نيوتن عن نوع المدارات التي ترسمها الكواكب بتأثير قوة الثقالة، وكان سؤاله هذا في بداية الكتاب. وهو الذي موّل تكاليف الطبع وهو الذي «كان يتشاور

مع نيوتن، ويلطف بلباقته نزاعاً قائماً بين نيوتن وهوك، ويشرف على تحرير نص كتاب المبادئ، كما كتب قصيدة مديح باللاتينية تصدرت الكتاب تكريماً للمؤلف، وصحح تجارب طبعه، وشرح مراميه في الصحف عام 1687 »[8].

وقد ابتدع هالي أيضاً أول خريطة لأحوال « الطقس » أظهر فيها توزع الرياح السائد فوق البحار، ونظم جدول وفيات لمدينة بريسلو Breslau، فترك أثراً كبيراً في تطور جداول التأمينات، لأنها كانت إحدى المحاولات الأولى لربط العمر بالوفاة في جمهور من السكان. وقد سُلم هالي أيضاً قيادة زورق حربي للقيام ببعثة علمية مدتها ثلاث سنوات إلى جنوب الأطلسي لكي يقيس خطوط الطول وخطوط العرض عند المرافىء التي تتوقف فيها المراكب. وقد ظل الملاحون يستخدمون الخرائط التي نظمت بحسب أرصاد هالي مدة طويلة بعد وفاته.

وفي عام 1704 عاد هالي إلى انكلترة ليصبح أستاذاً للهندسة في أكسفورد. وفي العام التالي نشر خلاصة وافية يصف فيها مدارات 24 مذنباً كانت قد رصدت في القرون الأربعة السابقة لعصره. وكان من بينها ثلاثة مذنبات متشابهة رُصدت على فترات متساوية تساوي كل منها 76 سنة تقريباً، فدفعه هذا التشابه لأن يستنتج بحق أن المذنبات الثلاثة كانوا مذنباً واحداً (هو الذي يسمى الآن باسمه)، وأنه سيعود بعدما يقرب من 76 سنة[9]. وقد قام هالي أيضاً بدراسات مستفيضة عن مدار الزهرة وحسب بعدها عن الشمس وعن الأرض، واستخدم في ذلك طريقة اختلاف المنظر.

عصر ما بعد نيوتن
مبادئ الانحفاظ الديناميكية

«تتكون المفاهيم في أول الأمر عن طريق التجريد بدءاً من أوضاع خاصة أومركبات تجريبية، ثم تكتسب في النهاية حياة خاصة بها».
ـ فيرنر هايزنبرغ*

لقد اتخذ الميكانيك النيوتني في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر صورة بنية رياضية فائقة الشمول حين تطور من مجموعة من المعادلات البسيطة التي كانت قد هيئت لدراسة أو تحليل حركة جسيم مفرد يندفع بتأثير قوة معرفة تعريفاً جيداً، إلى مجموعة معقدة من المعادلات ذات المشتقات الجزئية هيئت لدراسة التأثيرات المتبادلة بين العديد من الجسيمات وحركاتها. وقد نشأ هذا كله عن قوانين نيوتن كما نص عليها هو نفسه في الحركة وفي الثقالة. ولسنا بحاجة هنا إلى عرض هذه المعادلات بكل صوريتها المعقدة، بل يكفينا، لإدراك مدلولها وفهم أهميتها في تطوير الفيزياء في عصر ما بعد نيوتن، إلقاء نظرة قصيرة تؤكد على الأجزاء الهامة منها. ولذلك سنقتصر على النظر في ثمرة الجهود التي تضافرت وساهمت في هذا التطوير، والتي بذلها رياضيون وفيزيائيون نظريون من أمثال موبرتوي Maupertuis، و لاغرانج Lagrange و أولر Euler و لابلاس Laplace و دالامبير D'Alembert و بواسون Poisson و هاملتون Hamilton و غوص Gauss و جاكوبي Jacobi، ولكننا لن نعرض لمساهمات هؤلاء الفردية لأنها ستبعدنا عن مجالنا.

كانت مساعي هؤلاء الرجال الكبار في إنشاء ميكانيك ما بعد نيوتن التقليدي، تسير بهدي مجموعتين من المبادئ العامة، هما مبادئ الانحفاظ ومبادئ الأصغريات. وكان الدافع إلى مبادئ الانحفاظ هو بحث الفيزيائيين عن الثبات في الطبيعة. فقد كان هذا الثبات قبل عصر نيوتن مرتبطاً

* Werner Heisenberg (1901-1976) اقرأ ترجمته في الفصل (17).

بالأشياء المادية، مثل الأرض والشمس والنجوم والسماوات عامة. فاللاهوت المسيحي كان يصور هذه الأشياء بأن الله قد خلقها لتظل أبدية بدون تغيير. مع أن الشاعر اللاتيني لوكريتيوس Lucretius كان، قبل المسيحية، يصف العالم بأنه دائم التغير وأنه ما من شيء فيه باق على حاله. ولكن فيزيائيي عصر ما بعد نيوتن، على الرغم من قبولهم فكرة لوكريتيوس عن دوام التغير في الأشياء المادية، كانوا يبحثون عن ثبات في المبادئ التي تهيمن على سلوك العالم. وهذه المبادئ هي طبعاً قوانين الطبيعة، فهي تبقى كما هي نفسها في كل مكان وزمان وتسيطر على جميع الظواهر. ولكن هؤلاء الفيزيائيين وجدوا بعد سبر قوانين نيوتن أن هذه القوانين تتطلب ثباتاً من نوع آخر، هو ثبات في كميات بعض الكيانات المقيسة التي تقترن بفئات من الجسيمات المتفاعلة، ولقد دعي كل ثبات من هذا النوع «مبدأ انحفاظ»، كما أن كل ثبات من هذا القبيل يعبر عنه مبدأ انحفاظه الخاص الذي يضبطه ويحكم أصوله.

أما مبادئ الأصغريات فتختلف عن مبادئ الانحفاظ. فالأولى تفرض ضرورة سير الحوادث بطريقة تتغير فيها بعض الأوجه في هذه الحوادث بأقل كمية ممكنة، في حين تحافظ الثانية على سلسلة من الكيانات المقيسة لتؤكد أنه ما من شيء قد فقد. كما أن الكميات المنحفظة (التي تخضع لمبادئ الانحفاظ)، ليست هي الكميات نفسها التي تخضع لمبادئ الأصغريات، بيد أن المجموعتين تتألفان من كيانات ديناميكية يمكن أن تُستمد من الكيانات التي سبق أن أدخلناها والتي تدخل في قوانين نيوتن. سنبدأ النظر أولاً في مبادئ الانحفاظ، مع ملاحظة أن هذه المبادئ ترتبط، كما سنرى، ارتباطاً صميمياً ببعض تناظرات المكان ــ الزمان التي تكشف في الطبيعة عن نفسها في تناظر بنية ما يحيط بنا، مثل التناظر في بنية ندف الثلج والمجوهرات أو البلورات والمتعضيات الحية. ولما كانت هذه التناظرات البنيوية مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بتناظرات القوى التي تهيمن عليها، فإنه يمكن تقصي آثارها حتى تناظرات مبادئ الانحفاظ في المكان ــ الزمان.

انحفاظ الاندفاع

دعونا نتابع جسيماً يتحرك على مدار معروف (وليكن، مثلاً، جسماً يسقط على سطح الأرض وفق قوس من قطع مكافئ)، ولنلاحظ أن له في كل نقطة من مساره متجه سرعة معروفاً نستطيع أن نمثله بسهم يشير إلى جهة الحركة ويمس المسار في تلك النقطة. لنضرب الآن متجه سرعة الجسيم v بكتلته m لكي نحصل على كمية جديدة ثانوية mv ندعوها اندفاع الجسيم ولتكن P.
فهذه الكمية هي أيضاً متجه يشير إلى ما يشير إليه متجه السرعة نفسه. وما دامت دراستنا تقتصر على دراسة حركة الجسم (أي تتبع حركته من نقطة إلى أخرى على مساره)، فإنه يكفي أن نعرف متجه سرعته من لحظة إلى أخرى، أما إذا كنا مهتمين بديناميك حركة الجسم، فإن علينا أن ندخل

كتلته أيضاً في الحسبان. ويكفي لإظهار السبب في ذلك أن نفكر لحظة بتجربتنا اليومية مع حركة الأجسام؛ فنحن نعرف أن تأثير أي جسم فينا حين يصدمنا لا يتوقف على سرعة حركته فحسب بل على مقدار كتلته أيضاً. أو بعبارة أخرى، إذا أردنا أن نقاوم حركة جسم ما (لتجنب الاصطدام به) نحاول رده عنا على قدر اندفاعه، لا على قدر متجه سرعته فحسب. فالكتلة إذن لها أهميتها في الديناميك، وهذا ما يشير إليه وجود الكتلة في قانون نيوتن الثاني في الحركة، فهو ينص على أن القوة المؤثرة في جسم ما تساوي جداء كتلته في معدل تغير سرعته (أي في تسارعه)، على أن هذه الصيغة للقانون الثاني لا تطبق إلا على حركة جسم تبقى كتلته ثابتة عند تأثير القوة فيه. ولكن دعونا نتصور جسماً يفقد شيئاً من كتلته أو يكتسبه حين تدفعه قوة ما أو تشده، فعندئذ لا يصح أن نطبق القانون بصورته البسيطة، أي القوة تساوي جداء الكتلة في التسارع، لأن الكتلة تتغير باستمرار، كما هو الأمر في حالة قمر اصطناعي حين يطلق إلى مداره، وفي الوقت نفسه يحترق الوقود الذي يقذفه. ففي البدء، أي قبل إطلاق القمر، تكون كتلته مساوية لمجموع كتلتي الوقود مع الحمولة الصافية (جسم القمر)، ولكنها تتناقص بعد إطلاقه لأن وقوده يتناقص حتى ينفد.

وكان نيوتن عارفاً بهذه الصعوبة في قانونه الثاني، فرأى أن من الأصلح أن تساوي القوة المؤثرة في الجسم معدل تغير اندفاعه بدلاً من مساواتها جداء كتلته في معدل تغير متجه سرعته. فالنص الصحيح الذي يعبر في الحقيقة عن قانون نيوتن الثاني في الحركة هو: إن القوة المؤثرة في جسم ما تساوي معدل التغير الذي يطرأ على اندفاعه وتكون في الاتجاه الذي يتغير فيه هذا الاندفاع. وهكذا يستطيع المرء، إذا ما وعى هذه النقطة، أن يحسب القوة المؤثرة في جسم ما على مرحلتين: أولاً، أن يعامل الجسم في أي لحظة كأن كتلته لا تتغير في هذه اللحظة، فيضرب كتلته بمتجه تسارعه في هذه اللحظة. ثانياً، أن يعامل الجسم كأن متجه سرعته لا يتغير في تلك اللحظة، ذاتها، فيضرب متجه سرعته بمعدل تغير كتلته في هذه اللحظة. ولكي يحصل على القوة المؤثرة في الجسم في تلك اللحظة ذاتها يجمع الجداءين اللذين حصل عليهما في الخطوتين السابقتين.

ويُستدل حالاً من طريقة التعبير هذه عن القانون الثاني أن الاندفاع مهيأ للانحفاظ، إذ يتضح من صيغة القانون أن اندفاع الجسم لا يتغير (أي يبقى على قيمته) إذا لم تؤثر فيه قوة ما، بيد أن ثبات اندفاع جسم واحد حين لا تؤثر فيه قوة ما لا يكشف أهمية انحفاظ الاندفاع بكاملها، لذلك، وقبل أن نبدأ باثبات أن الاندفاع منحفظ في مجموعة مؤلفة من أي عدد من الأجسام التي يؤثر كل منها في الآخر بطريقة ما حين تتحرك، دعونا نبدأ أولاً بدراسة أبسط حالة تأثير متبادل بين جسمين ثم نعمم نتائجنا على حالة أجسام عديدة. لنتصور أولاً كرتين صغيرتين لهما كتلتان صغيرتان مختلفتان ومتجها سرعتيهما بالنسبة للأرض مختلفان ولا تتبادلان أي تأثير، وتتحرك كل منهما نحو الأخرى على الخط المستقيم الواصل بين مركزيهما. ولما كانت كل من الكرتين لا تؤثر في الأخرى

إلا لدى اصطدامهما فلنحلل تاثير الاصطدام على الاندفاع الكلي لجملتهما لكي نرى هل يغير الاصطدام هذه الكمية الهامة أم لا . وللحصول على الاندفاع الكلي لمجموعة الكرتين في أي لحظة، نجمع اندفاعي الكرتين، مع مراعاة أن الاندفاع متجه، أي أن له اتجاهاً؛ لذلك، إذا كانت الكرتان تتحركان على خط يميناً ويساراً، نخصص الاتجاه الموجب للكرة التي تتحرك نحو اليمين مثلاً، فيكون اندفاع الأخرى سالباً. فمقدار الاندفاع الكلي لمجموعة الكرتين، هو إذن، الفرق بين مقداري اندفاعي الكرتين، ويكون هذا الفرق متجهاً إلى اليمين إذا كان موجباً وإلى اليسار إذا كان سالباً. على أننا سنفترض في هذا المثال (بغية التبسيط)، أن هذا الفرق يساوي الصفر.

ففي أثناء الاصطدام الذي يدوم جزءاً صغيراً من الثانية، تدفع كل من الكرتين الكرة الأخرى، ويكون الدفعان بحسب قانون نيوتن الثالث متساويين ومتعاكسين. فتفقد كل كرة بالتالي شيئاً من اندفاعها بمعدل يساوي معدل ما تفقده الثانية في الاتجاه الذي تتحرك فيه عند الاصطدام وينتقل اندفاعها الأمامي إلى الكرة الأخرى، إلى أن تتوقف كلتا الكرتين في لحظة ما، كل منهما بالنسبة إلى الأخرى. ولكن التأثير المتبادل لا يتوقف عند هذه النقطة، إذ إن كل كرة تستمر (بسبب تشوهها الناتج عن الاصطدام) في دفع الكرة الأخرى في الاتجاه السابق نفسه، فتنفصل الكرتان وتتحرك كل منهما بالنسبة للأرض بمتجه سرعة بحيث يكون الاندفاع الكلي للكرتين اللتين تؤلفان جملة واحدة باقياً على حاله كما كان قبل الاصطدام، أي يساوي الصفر.

وهذا هو جوهر مبدأ انحفاظ الاندفاع الذي لا يعدو أن يكون في الحقيقة، استمراراً أو نتيجة لقانون نيوتن الثالث. فهذا القانون يفيدنا بأنه إذا أثر أحد جسمين في الآخر بطريقة ما، فإن كلاً منهما يتنازل عن كمية متجهة من اندفاعه للآخر تساوي وتعاكس الكمية المتجهة التي يتنازل عنها الجسم الآخر من اندفاعه، فتبقى كمية اندفاعهما الكلية على حالها طالما لم تؤثر فيهما قوة خارجية (أي قوة غير التي يؤثر بها أحدهما في الآخر). أو بعبارة أخرى، يؤدي قانون نيوتن الثالث، بفعله ورد فعله، إلى تغيرات في الاندفاعات يلغي بعضها البعض الآخر تماماً، حتى لكأن الطبيعة تقوم (فيما يتصل بالاندفاعات) بعملية تصفية محضة أشبه ما تكون بتصفية الحسابات المصرفية. أو بمعنى آخر، لا شيء يضيع أبداً من الاندفاع، بل كل ما في الأمر أنه ينتقل من جسم إلى آخر.

وعلى الرغم من أننا حللنا هذا المبدأ وبينا نصه، في حالة جسمين فحسب يتبادلان التأثير، فإنه ينطبق كذلك على حالة أي عدد من الأجسام التي تتبادل التأثير. من ذلك مثلاً، جزيئات الغاز التي تتحرك عشوائياً كيفما اتفق، ويتصادم أحدها مع الآخر باستمرار، أو النجوم في مجموعة النجوم المتحركة، أو الذرات في جسم صلب. ففي مجموعة من الأجسام (أو الجسيمات) مثل هذه، نعين اندفاعاً كلياً هو ما نحصل عليه من أخذ مجموعة الأجسام كلها في الحسبان في لحظة معينة؛ إذ إن كل جسم له في هذه اللحظة متجه اندفاع خاص به، تساوي قيمته جداء كتلة

الجسم في متجه سرعته، ويمكن تمثيله بسهم ذي طول معين ويشير إلى اتجاه حركة الجسم. فإذا جمعنا الآن هذه الأسهم كافة (جمعاً متجهياً، لكي ندخل في حسابنا مختلف الاتجاهات) فإننا نحصل على سهم وحيد يرتبط بنقطة معينة في المجموعة ويشير إلى اتجاه محدد وله مقدار معين. إن هذا السهم، هو الذي يعطي الاندفاع الكلي لمجموعة الأجسام، ونسمي النقطة التي يرتبط بها «مركز كتلة» الأجسام. وحينما تتحرك الأجسام من مكان لآخر ويؤثر بعضها في بعض يتغير السهم العائد لكل جسم (والذي يمثل اندفاعه الآني)، في مقداره وفي اتجاهه باستمرار، ولكن السهم المرتبط بمركز الكتلة (والذي يمثل الاندفاع الكلي لجملة المجموعة)، يبقى ثابتاً في اتجاهه ومقداره طالما لم تؤثر قوة خارجية في جميع الأجسام معاً. فإذا كان طول هذا السهم صفراً، كان الاندفاع الكلي لمجموعة الأجسام صفراً أيضاً. وحين يكون طول هذا السهم مكافئاً لمتجه سرعة v فإن مركز كتلة المجموعة يتحرك، وبالتالي المجموعة نفسها، في اتجاه السهم بسرعة متجهية v، ويكون اندفاع المجموعة الكلي مساوياً Mv، حيث يدل M على الكتلة الكلية للمجموعة (أي أن M هي مجموع كتل الأجسام إفرادياً). وهكذا، يمكن أن نعبر عن مبدأ انحفاظ الاندفاع كما يلي: إذا لم تؤثر قوة خارجية في مجموعة من الأجسام، فإن مركز كتلة المجموعة يبقى ساكناً إذا كان في البدء ساكناً، أو يثابر على حركته في الخط المستقيم نفسه وبمتجه سرعة ثابت إذا كان في البدء كذلك.

إن لمبدأ الانحفاظ البسيط هذا أهمية بالغة في تحليل حركة الأجسام التي تتبادل التأثير فيما بينها. ففي فيزياء الجسيمات العالية الطاقة، قام هذا المبدأ بدور حاسم في اكتشاف جسيمات جديدة، كما أن له صلة بتناظر قوانين الطبيعة المكاني ــ الزماني، إذ يعني صلاحُ مبدأ انحفاظ الاندفاع أن قوانين الطبيعة تناظرية بالنسبة إلى أي تغير مكاني في مرجع مقارنة المراقب، أي أن انزياح مرجع مقارنة المراقب في المكان، لا يبدل إدراكه لقوانين الطبيعة. فقوانين الطبيعة تظل صامدة Invariant عند انتقال مجموعة إحداثياتها.

ويرجع السبب في هذه العلاقة بين التناظر المكاني وانحفاظ الاندفاع إلى أن هذا المبدأ ينص على أنه إذا لم تؤثر قوة خارجية في مجموعة من الجسيمات، فإن المراقب الذي يتحرك مع مركز كتلة هذه المجموعة، يكون سلوك الجسيمات بالنسبة إليه (والقوانين التي تسيطر بالتالي على هذا السلوك) هو نفسه سواء أكان مركز الكتلة ثابتاً في نقطة واحدة، أم كان متحركاً (بسرعة متجهها ثابت) من نقطة إلى أخرى.

مفهوم الطاقة

يقترن مبدأ انحفاظ الاندفاع اقتراناً وثيقاً بمبدأ انحفاظ آخر هو مبدأ انحفاظ الطاقة. ونحن نستنتج مفهوم الطاقة من الكيانات الأساسية (الطول والزمن والقوة) ومن الكميات الثانوية المشتقة (الكتلة والسرعة والتسارع) ولا يحتاج استنتاجه إلا إلى تركيب بعض هذه الكميات تركيباً جبرياً

يؤدي إلى كيان مشتق نسميه طاقة. بيد أن هذه الطريقة لا تفيد في إظهار ما نحتاجه لفهم مزايا الطاقة، أو خواصها الفيزيائية التي اتصفت بها الفيزياء في صورتها الحاضرة بعد إعلان قوانين نيوتن في الحركة بزمن طويل. فعلى الرغم من أن هويغنز وليبنتز كانا قد أدركا إدراكاً صحيحاً العلاقة بين حركة الجسم وطاقته، إلا أن تطور مفهوم الطاقة الميكانيكية، كما نستخدمه الآن، لم يكتمل إلا عندما برز في أعمال أولر ولابلاس ولا سيما لاغرانج Lagrange الذي جعله أساس عمله الشهير في الميكانيك التحليلي. فقد حاول لاغرانج في بحثه هذا أن يبني الميكانيك النيوتني على صورة علم بديهي قائم بذاته، يبدأ من مفهوم الطاقة بدلاً من قوانين نيوتن في الحركة.

لقد حاولنا، قدر الإمكان حتى الآن، أن ندخل المفاهيم الميكانيكية، أو نستنتجها عن طريق ربطها بمدركاتنا الفيزيائية (الحسية) بدلاً من تقديمها على صورة كيانات جبرية مجردة. ولكن الطاقة مجرد مفهوم عار لا يكتسي، كالطول أو الزمن أو متجه السرعة أو التسارع أو القوة أو الكتلة، أي حلة تدركها حواسنا، فكيف يمكن أن نتبع طريقة مماثلة في حالة الطاقة؛ لكنها ترتبط لحسن الحظ بعملية فيزيائية أو بكيان له مثل هذه الحلة، ويسمى العمل (وهو في حقيقة الأمر مكافىء للطاقة). ونحن جميعاً نفهم العمل (بمعناه الفيزيائي) على أنه قوة تمارس مهمة فيزيائية ــ مثل جر جسم ما مسافة معينة ــ لذلك سنجعل من هذا الواقع تعريفاً تقنياً للعمل، ثم نرى كيف يقودنا إلى مفهوم الطاقة في جميع صورها.

إننا حين نقوم بعمل على جسم ما بتطبيق قوة عليه، يتغير هذا الجسم ويكتسب طاقة تظهر بصور أو أنواع مختلفة، بحسب طبيعة التغير الذي طرأ على الجسم. وعندئذ نساوي بين كمية الطاقة التي اكتسبها الجسم، والعمل الذي بذلته القوة حين أثرت فيه. ولكي نجعل هذه المعادلة واضحة المعالم، نبدأ بتعريف العمل على أنه جداء القوة، المؤثرة في الجسم، في انتقال الجسم (أو انتقال أي جزء منه) في اتجاه القوة المطبقة عليه. وهذا التعريف معقول ومقبول، لأنه يعطي بالتحديد قيمة العمل الذي نتقاضى عليه أجراً إذا نحن قبلنا القيام بدفع جسم ثقيل مسافة معينة. فلو قبلنا مبلغاً معيناً من المال لكي ندفع جسماً كهذا 100 قدم، لكان لدينا ما يبرر مطالبتنا بضعفي هذا المبلغ لدفع الجسم نفسه 200 قدم (ضعفي المسافة)، وكذلك بضعفي المبلغ فيما لو طلب منا دفع جسمين كهذا الجسم (ضعفي القوة) المسافة 100 قدم نفسها. أو بعبارة أخرى، إذا كان الأجر قياساً حقيقياً للعمل، فإن العمل يجب أن يعرّف عندئذ على أنه جداء القوة في المسافة. وهذا ما نعبر عنه جبرياً: العمل = القوة × المسافة أو $W = Fd$. ولكن يجب أن يكون الانتقال في اتجاه القوة، ولذلك فإن التعريف الصحيح للعمل المبذول لنقل جسم ما هو جداء القوة المطبقة على الجسم في جزء من انتقال هذا الجسم هو الجزء الواقع في اتجاه القوة.

ولكي نحدد كمية العمل الذي تبذله قوة ما، وبالتالي كمية الطاقة التي اكتسبها الجسم،

علينا أن نعرف وحدة العمل التي يمكن أن نحصل عليها من وحدات الكيانات الفيزيائية التي تعرف العمل .. وهكذا فإن وحدة قوة (1 دينة) إذا نقلت جسماً وحدة مسافة (1 سنتيمتر) ، فإنها تقوم بعمل هو وحدة عمل ، لأن W (العمل) يساوي جداء F في d ،.فالعمل يجب أن يساوي 1 ، إذا كان كل من F و d يساوي 1 . وتسمى هذه الوحدة « إرغة » ، وهي أيضاً وحدة الطاقة في الميكانيك . ولا يتعلق العمل المبذول لنقل جسم ، إلا بمقدار القوة ومقدار الانتقال . ولذلك فإن قوة 1 دينة ، المطبقة على جسم ، تنقله مسافة 1 سنتيمتر في اتجاهها تبذل عملاً قيمته 1 إرغة ، سواء أكان الجسم حبة رمل أم قطاراً للشحن .

ونبدأ الآن ، بوصف مختلف الصور التي يمكن أن تتخذها طاقة الجسم وصفاً متأنياً ، لأن صورة هذه الطاقة التي يكتسبها الجسم من عمل تصرفه قوة عليه ، لا تكشف مباشرة عن نفسها على أنها طاقة . ولنبدأ أولاً بالطاقة الحركية : نطبق قوة أفقية على جسيم ساكن موضوع في الخلاء (لا وجود لمقاومة الهواء) على سطح أفقي أملس تماماً (بلا احتكاك) فنرى أن الجسيم يتحرك بسرعة معينة بعد أن أوقفت القوة تأثيرها فيه . إن طاقة الجسيم متضمنة في هذه السرعة التي منحته القوة إياها ، لذلك ندعو طاقة الحركة المكتسبة هذه « طاقة حركية » . ويمكن ، بتمرين جبري بسيط ، بيان أنه ، إذا كانت m كتلة الجسم و v سرعته النهائية ، فإن الطاقة الحركية التي يكتسبها الجسيم ، بحسب تعريف العمل ، تساوي $\frac{1}{2}mv^2$. فإذا اكتسب جسم كتلته 10 غرامات سرعة « مقدارها 100 سم / ثا » بعدما كان ساكناً ، فإن طاقته الحركية المكتسبة تساوي 50000 إرغة . وهكذا أصبحنا نستطيع أن نتحدث الآن عن الطاقة الحركية لجسم ما ، بوجه عام ، بغض النظر عن كيفية اكتساب الجسم لها . فإذا كان الجسم يتحرك بسرعة v ، بالنسبة إلى مراقب ، فإن طاقته الحركية بالنسبة إلى هذا المراقب هي $\frac{1}{2}mv^2$. ولا يصح تعريف الطاقة الحركية إلا بتخصيص مراقب ، لأن سرعة الجسم ليس لها معنى بأي وجه مطلق . فلو كان لدينا جسم ساكن على الأرض فإن هذا الجسم ليست له طاقة حركية بالنسبة إلى مراقب على الأرض ، ولكنه يملك طاقة حركية هائلة بالنسبة لمراقب على الشمس . وسنرى أن الطاقة بوجه عام ، لا يمكن أن تعرف بطريقة مطلقة ، بل تتطلب دائماً إضافة ثابت اختياري يتغير بتغير مرجع مقارنة المراقب .

لننظر الآن في العمل الذي يصرف على جسم لا يملك حرية الحركة بل هو مقيد بطريقة ما ، ولنبدأ بجسيم في حقل ثقالة ، وموضوع مثلاً على سطح أرض ملساء ملاسة كاملة مثالية . فإذا دفعنا هذا الجسيم أفقياً لبرهة وجيزة اكتسب ، بحسب دراستنا السابقة ، طاقة حركية واستمر في حركته على سطح الأرض المثالي إلى الأبد . ويمكن أن نتساءل : ماذا سيحدث إذا صادف هذا الجسيم في طريقه حفرة ملساء تماماً ؟ إنه سوف ينزلق إلى أسفل بسرعة تتزايد ، ثم يعود بعدئذ إلى الصعود بسرعة تتناقص ، ثم يتابع حركته الأفقية . فدعونا نحلل الآن طاقته عندما كان يتحرك في الحفرة . إن ازدياد

السرعة عند انزلاقه إلى أسفل الحفرة يعني أنه ربح طاقة حركية تضاف إلى طاقته، فلا بد أن يكون العمل الذي يعادل هذه الطاقة التي ربحها الجسم، هو العمل الذي صرف عليه، وهذا العمل كما نرى حالاً، هو الذي قامت به قوة جذب الأرض. فلندرس فكرة هذا العمل الذي يقوم به حقل قوة (حقل الجاذبية الثقالية) أو يبذل تجاه حقل قوة، ولنر كيف تعرف الطاقة المرتبطة به (طاقة الحقل).

إن أفضل طريق إلى هذا التعريف، هو أن نعتبر العمل المبذول عند رفع جسيم كتلته m (أو ثقله W = mg ؛ g هو تسارع الثقالة) إلى ارتفاع h فوق الأرض. إن القوة الشاقولية التي تؤثر بها في هذه الحالة تساوي ثقل الجسيم W، وهي ترفعه شاقولياً إلى ارتفاع h. فالعمل الذي تبذله على الجسيم، يساوي Wh (جداء القوة في المسافة)، وهذا يعني أن طاقة الجسيم عند الارتفاع h أكبر من طاقته عند سطح الأرض، بمقدار يساوي هذا العمل تماماً. فالوضع هنا يختلف اختلافاً واضحاً عما رأيناه في حالة الطاقة الحركية. فهناك رأينا نتيجة عملنا (أي الطاقة الحركية) في حركة الجسم، في حين لا نرى هنا اختلافاً في سلوك الجسيم عند الارتفاع h عما كان عليه على سطح الأرض. والحقيقة أن الاختلاف ليس في سلوكه، بل في وضعه بالنسبة إلى سطح الأرض، الذي نجم عن ازدياد طاقته. لذلك ندعو هذا النوع من الطاقة الذي يتعين بالوضع بدلاً من الحركة «طاقة وضع» أو طاقة كامنة، وهذا اسم ملائم، لأن العمل الذي بذلناه على الجسيم، سيظهر على صورة طاقة حركية، حالما يترك الجسيم ليسقط حراً من الارتفاع h. والشيء الوحيد الذي يحسب حسابه عند قياس طاقة الوضع أو الطاقة الكامنة لجسيم أو عند تعيينها، هو (فيما عدا ثقل الجسم) ارتفاعه عن الأرض. أما المسار الذي ينتقل عليه لكي يصل هذا الارتفاع أو يهبط منه فلا أهمية له.

ونلاحظ أنه يمكن تعريف الطاقة الكامنة بالنسبة إلى أي سطح كان؛ فهي إذن كالطاقة الحركية، لها أيضاً ثابت اختياري يرتبط بها، وهذا ما يتضح من الدراسة التالية: لننظر في حالة جسم على مستوى سطح البحر، وآخر مماثل له في قعر هوة (تحت سطح البحر)، وثالث أيضاً مماثل للسابقين على قمة جبل فوق سطح البحر. فإذا عرفنا الطاقة الكامنة الصفرية أنها طاقة وضع جسم على مستوى سطح البحر، فإن الطاقة الكامنة للجسيم الأول تساوي الصفر، ولكن الجسيم الموجود في الهوة تكون طاقته الكامنة عندئذ سالبة، أما الطاقة الكامنة للجسيم الموجود على قمة الجبل فتكون موجبة. وإذا اتخذنا مستوى قمة الجبل مستوياً للطاقة الكامنة الصفرية، فإن الطاقة الكامنة للجسيمين، عند سطح البحر، وفي الهوة تكون سالبة. فطاقة الوضع يمكن أن تكون سالبة، أو صفراً، أو موجبة، وذلك بحسب اختيارنا لمستوى الإسناد (أي مستوى الطاقة الكامنة الصفرية)، في حين أنه لا يمكن أن تكون الطاقة الحركية إلا صفراً أو موجبة.

ولا يجد الناس، بوجه عام، صعوبة في تصور طاقة موجبة أو منعدمة، ولكن الطاقة السالبة

تحيرهم جداً . فلكي نبسط هذا المفهوم فيسهل فهمه ، دعونا نعُد إلى الجسيم الموجود في الهوة ، مع اتخاذ مستوى سطح البحر مستوي الطاقة الكامنة الصفرية ، ولنرفع الآن هذا الجسيم ببذل عمل موجب عليه ، إننا نكسبه بذلك طاقة موجبة إلى أن يصل إلى مستوى سطح البحر حيث تصبح طاقته الكامنة صفراً . فإذا كانت هذه الطاقة التي وصل إليها ، بعد أن بُذل عليه عمل موجب هي الصفر ، فلا ريب أن طاقته الكامنة كانت في الهوة أقل من الصفر أي سالبة . فالحديث عن جسم يملك طاقة كامنة سالبة ، لا يعني أكثر من أن علينا أن نبذل عليه عملاً موجباً لكي نحمله إلى المستوى الذي اتخذناه مرجعاً للطاقة الكامنة الصفرية ، وهكذا فليس في هذا المفهوم كل ذلك الغموض .

والآن ، بعد أن استقرت هذه النقاط في أذهاننا ، لماذا لا نختار مستوى الإسناد للطاقة الكامنة الصفرية بحيث يكون معه الثابت في عبارة الطاقة الكامنة للجسيم عند نقطة ما واحداً في جميع النقاط (بالنسبة إلى جميع المراقبين) ؟ إن هذا الخيار لا يصح إلا بالنسبة إلى السطح الواقع في اللانهاية ، لذلك سنعزو إلى كل جسيم بعيد بعداً لا نهائياً طاقة كامنة تساوي الصفر ، وهذا يعني أن كل جسيم واقع على مسافة محدودة ، تكون طاقته الكامنة أقل من الصفر ، أي سالبة ، لأننا يجب أن نقوم بعمل موجب على هذا الجسيم لكي ننقله إلى اللانهاية .

والآن ، بعد أن حددنا الطاقة الكامنة الصفرية ، نستطيع أن نكتسب عبارة الطاقة الكامنة الثقالية لكل جسيم واقع على مسافة محدودة من مركز الأرض ، بشرط أن يكون ، هو والأرض ، الشيئين الوحيدين في هذا العالم . فإذا كانت m كتلة الجسيم وM كتلة الأرض ، وr بُعد الجسيم عن مركز الأرض ، وG ثابت الثقالة النيوتنية ، فإن العمل الذي نقوم به كي ننقل الجسيم إلى اللانهاية لا يتوقف إلا على هذه الكميات الأربع . ونذكر أن العمل يساوي جداء القوة (وهي هنا الثقالة) في المسافة ، وأن القوة لا علاقة لها إلا بالكميات الأربع التي ذكرناها ، فالعمل المبذول إذن لا يتعلق إلا بهذه الكميات . وهكذا نستطيع أن نستنتج الآن ، عبارة العمل المبذول (أي الطاقة الكامنة السالبة) بالاستناد إلى مناقشة عامة . من المعروف أن قوة الثقالة تكون كبيرة ، إذا كانت M وm كبيرتين (لأنها تتعلق بجدائهما) ، فالعمل المبذول يجب بالتالي أن يتعلق أيضاً بهذا الجداء ، أي بالقيمة GMm . ولكن كلما كنا أقرب إلى مركز الأرض (أي كلما صغرت المسافة r) ، كان العمل الذي يجب القيام به أكبر ، لأن الثقالة تكون أشد عند النقطة التي نبدأ منها كلما كانت r أصغر . فإذا دمجنا الآن هاتين التبعيتين حصلنا على عبارة واحدة هي $\frac{GMm}{r}$ ، وهي قيمة العمل المبذول ، فالطاقة الكامنة للكتلة m عند المسافة r عن مركز الأرض ، هي $\frac{GMm}{r}$ ، وهذه القيمة لا تصح إلا إذا كانت الأرض والجسيم هما الشيئان الوحيدان في هذا العالم ، أما إذا وجدت أجسام أخرى معهما ، فعندئذ تكتب عبارة سالبة مشابهة للسابقة من أجل كل جسم ، مع وضع كتلة الجسم

مكان M ووضع بعد الجسم عن الكتلة m مكان r في كل حالة، وتصبح الطاقة الكامنة الكلية للكتلة , عندئذ، هي مجموع كافة هذه العبارات السالبة . ويتضح من ذلك الآن، أنه إذا كان هناك جسيمان كتلتاهما m_1 وm_2، وتفصل بينهما مسافة r، فإن الطاقة الكامنة لكل منهما بالنسبة إلى الآخر هي $-\frac{Gm_1m_2}{r}$.

وإذا ضممنا هذه الكمية إلى عبارة الطاقة الحركية، نحصل على الطاقة الكلية لجسم كتلته m (كوكب مثلاً)، عند وجوده في الحقل الثقالي لكتلة أخرى M (الشمس مثلاً)، وتكون T = الطاقة الكلية = الطاقة الحركية + الطاقة الكامنة أو $T = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{GMm}{r}$. وتسمى T « الطاقة الميكانيكية الكلية » للجسيم . وفي حال وجود الجسم في حقل قوة، يضاف إلى الطاقة الكامنة في هذا الحقل الطاقة الكامنة لتشوهه تحت تأثير القوى المؤثرة فيه؛ لأن كل جسم، إذا شوهناه بتأثير قوة ما من دون أن ننقله (كأن نشد نابضاً مثلاً أو نمطه)، فإننا نبذل عليه عملاً من دون أن نزيد طاقته الحركية أو طاقته الكامنة الخارجية . ولكن إذا كانت الطاقة هي العمل المبذول، فلا بد إذن أن تكون طاقة تشوه الجسم قد ازدادت، وهذه الزيادة هي في حقيقة الأمر، زيادة في الطاقة الكامنة الداخلية، وهي ذات أهمية في دراسة خواص المواد الفيزيائية وفي أعمال الهندسة المدنية والميكانيكية، ولكن لا أهمية لها في الميكانيك النيوتني .

وأخيراً، حين نقوم بعمل في سبيل دفع جسم ثقيل بسرعة ثابتة على سطح أفقي خشن، فإننا في هذه الحالة لا نزيد طاقته الحركية أو طاقته الكامنة، فبأي طريقة تحول عملنا إلى طاقة، وأين هي هذه الطاقة؟ إن الطاقة الناشئة هنا عن العمل لم تحشد في الجسم الذي ندفعه، بل تبددت وانتقلت في جميع الاتجاهات بصورة حرارة إلى ما يحيط بالجسم .

انحفاظ الطاقة

بعد أن درسنا العمل والطاقة نستطيع أن ندرس الآن مبدأ انحفاظ الطاقة، ولكن مع الاقتصار على الطاقتين الكامنة والحركية لجسيم يتحرك في حقل ثقالي لا يعوقه فيه أي احتكاك . وخير مثال على هذا المبدأ اهتزاز النواس (البندول) . لنتخذ في دراسته أن الطاقة الكامنة لكرته تساوي الصفر عندما تكون في أخفض نقطة من تأرجحها (الأقرب إلى الأرض)، فإذا كانت كرة النواس ساكنة عند هذه النقطة، كانت طاقتها الميكانيكية الكلية (الكامنة مع الحركية) مساوية الصفر . فإذا بذلنا عليها عملاً وهي في هذا الوضع ودفعناها إلى أحد الجانبين، فإن هذا العمل يكسبها طاقة كامنة لأنها تصبح عندئذ في وضع أعلى فوق الأرض مما كانت، وتكون طاقتها كلها طاقة كامنة . ولكنها حين تهبط متأرجحة إلى الأسفل، تكتسب طاقة حركية وتخسر طاقة كامنة؛

غير أن الكرة لا تتوقف في النقطة التي بدأت منها حركتها (أخفض نقطة من القوس التي ترسمها)، وذلك بسبب عطالتها، وتكون طاقتها الكامنة حينئذ مساوية الصفر، أي تحولت طاقتها الكامنة كلها إلى طاقة حركية. فالكرة إذن تتأرجح مارة بأخفض نقطة لها، ثم تندفع على قوسِ مسارها لتبلغ أعلى نقطة في الطرف الآخر فتتغير بذلك طاقة الكرة من طاقة كامنة إلى طاقة حركية، ثم تعيد الكرّة من جديد. فإذا كانت حركتها عديمة الاحتكاك (أي لا وجود لمقاومة الهواء أو لاحتكاك بين خيط النواس وحامله عند نقطة تعليقه)، فإن طاقتها الكلية (الكامنة مع الحركية) تظل في كل نقطة من مسار حركتها ثابتة. وهذا هو مبدأ انحفاظ الطاقة الذي لا تخضع له كرة النواس في حقيقة الأمر، لأنها تسير في النهاية إلى السكون بسبب الاحتكاك، فهو يحول طاقتها الميكانيكية إلى حرارة. ولكن حركات الكواكب حول الشمس تحقق هذا المبدأ بصورة كافية؛ فالأرض مثلاً لها طاقة كامنة وطاقة حركية في كل نقطة من مدارها السنوي حول الشمس؛ ومجموع هاتين الطاقتين، أي طاقة الأرض الميكانيكية الكلية، تظل ثابتة (كما كانت كذلك منذ ملايين السنين)، على الرغم من أن طاقتها الحركية وكذلك طاقتها الكامنة تتغيران باستمرار. فحين تكون الأرض عند أبعد نقطة عن الشمس (الأوج)، تكون طاقتها الكامنة في حدها الأعلى وطاقتها الحركية في حدها الأدنى، وحين تكون في أقرب وضع لها من الشمس (الحضيض)، تكون طاقتها الحركية في أعلى حد لها، وطاقتها الكامنة في حدها الأدنى. ولو كانت طاقة الأرض الكلية تتناقص باستمرار لوجب أن تسقط على الشمس منذ أمد بعيد، ولو أن طاقتها الكلية كانت تزداد باطراد، لكانت الآن باردة ومجرد جرم ميت يحوم وحده في الفضاء بين النجوم.

لقد رأينا سابقاً أن مبدأ انحفاظ الاندفاع يقتضي أن تكون قوانين الطبيعة متناظرة في المكان (أي تبقى هذه القوانين هي نفسها أينما وضعنا مرجع المقارنة). وكذلك يعني أيضاً مبدأ انحفاظ الطاقة أن قوانين الطبيعة متناظرة في الزمان، أي أن قوانين الطبيعة تبقى صامدة لا تتغير مع تغير الزمن. ويعني هذا أننا إذا مثلنا الحالة الفيزيائية لمنظومة ما بكمية على صورة دالة (تابع) للمكان والزمان (أي كمية تتغير بتغيرهما)، فإن اندفاع المنظومة يرتبط بكيفية تغير حالتها الفيزيائية عندما تنتقل من موضع إلى آخر في المكان، وترتبط طاقتها بكيفية تغير حالتها من لحظة إلى أخرى. ويقوم هذا الصمود بدور مهم جداً في ميكانيك الكم، أي في النظرية التي حلت محل قوانين نيوتن في الحركة.

انحفاظ الاندفاع الزاوي

نادراً ما يفطن معظم الناس إلى أن قوانين نيوتن في الحركة، تنطبق على نوعي حركة الجسم، الانتقالية والدورانية معاً، إذ إنهم لا يفطنون إلا إلى تطبيقها على الحركة الانتقالية، مع أن هذه الحركة

الصرف نادرة الحدوث في الطبيعة، في حين أن الحركة الدورانية (الحومانية) هي السائدة لا النادرة، وهي القاعدة لا الاستثناء. وفي الحركة الانتقالية يبقى كل خط مستقيم واصل بين نقطتين من الجسم موازياً لنفسه، أي أن توجيهه الفضائي لا يتغير، في حين لا يبقى في الحركة الدورانية الصرف سوى مستقيم واحد موازياً لنفسه هو الذي يدعى محور دوران الجسم، وهو يتألف من جميع نقاط الجسم التي لا تتحرك في أثناء دورانه. ولنلاحظ أن الحركة الانتقالية تعني أن موضع الجسم يتغير بدون أن يتغير توجيهه، في حين أن الحركة الدورانية تعني أن توجيه الجسم يتغير، من دون أن يتغير موضعه.

ولمّا لم يكن بالإمكان تطبيق قانون نيوتن الثاني في الحركة مباشرة على جسم يدور بحركة مغزلية، (إذ ليس له بكليته تسارع)، لذلك يجب توسيع هذا القانون لكي يشمل حركة كهذه. فلنبدأ أولاً بحركة جسيم كتلته m (أي نقطة مادية) يتحرك بسرعة ثابتة v على محيط دائرة نصف قطرها r. إن كمية اندفاع هذا الجسيم mv ثابتة ولكن اتجاهه يتغير باستمرار، فمتجه اندفاع الجسيم غير ثابت (غير منحفظ)، مما يعني أن هناك قوة موجهة نحو مركز الدائرة، تؤثر في الجسيم باستمرار، لكي تبقيه متحركاً على الدائرة. وعلى الرغم من أن اندفاع الجسيم غير ثابت، فإن هناك خاصة فيزيائية أخرى في الحركة تظل ثابتة (أو منحفظة)، وهي التي تقودنا إلى مفهوم الاندفاع الزاوي (أو العزم الزاوي، أو العزم الحركي). ولإيجاد هذه الخاصة الديناميكية، نلاحظ أن الكميات m وv وr تبقى ثابتة أثناء حركة الجسيم، فجداء هذه الكميات الثلاث mvr يبقى كذلك ثابتاً، كما أن منحى المحور الذي يدور حوله الجسيم، أي المستقيم المار بمركز الدائرة والعمودي على مستويها، يبقى كذلك ثابتاً. لذلك، نخص حركة الجسيم بمتجه جديد مقداره mvr واتجاهه هو اتجاه محور دوران الجسيم، وهذا المتجه الثابت هو ما ندعوه «الاندفاع الزاوي» للجسيم. وسنبين أنه يخضع أيضاً لمبدأ انحفاظ كالاندفاع والطاقة.

ولكن دعونا نفترض، قبل القيام بذلك، أن لدينا جسماً يدور (بدلاً من نقطة مادية)، ولنتصور أن الجسيم السابق مرتبط بمحور الدوران بقضيب عديم الوزن (أي لا كتلة له)، وبذلك يؤلف القضيب والجسيم معاً جسماً يدور باندفاع زاوي قيمته mvr. ولنلاحظ أن هذه الكمية واتجاه محور الدوران يبقيان ثابتين على الرّغم من وجود قوة ثابتة تؤثر في الجسيم. فيمكن إذن أن يبقى الاندفاع الزاوي لجسم ما ثابتاً، على الرغم من وجود قوة تؤثر في هذا الجسم، مما يدل على أن انحفاظ الاندفاع الزاوي يرتبط بغياب شيء آخر غير مجرد قوة. أي لا بد أن يكون لدينا شيء ما بالإضافة إلى القوة، ولكي نرى ما هو هذا الشيء، دعونا نتصور دولاباً غير مثبت يمكن تدويره حول محوره، فإذا شددناه بمجرد سحبه وفق أحد أقطاره، فإنه يتحرك نحونا بكليته دون أن يدور، ويجب لتدويره أن نسحب محيطه (أو ندفعه)، أو نؤثر فيه بقوة عمودية على أحد أقطاره وعلى مسافة

معينة من محوره . فتبعاً لمبدأ نيوتن في الفعل ورد الفعل ، يولّد هذا الدفع أو الشد ، رد فعل يساويه ويعاكسه (هو رد الفعل العطالي) من الدولاب عند مركزه (وهي النقطة من قرص الدولاب التي يمر بها محوره) . وهكذا يؤثر في الدولاب قوتان متساويتان ومتعاكستان تفصل بينهما مسافة . إن مثل هذه المجموعة التي تتألف من قوتين متعاكستين والتي تؤثر في الجسم ــ من غير أن تكونا على مستقيم واحد ، أي أن تأثير إحداهما في الجسم لا يعادله تماماً تأثير الأخرى ــ تدعى « عزم الدوران Torque » وهي تطبق على جسم ما ، لتدويره ، أو لتوقفه عن الدوران ، أو ، بوجه عام ، لتغير اندفاعه الزاوي .

يتضح مما سبق أن مبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي ينص على ما يلي : إذا لم يؤثر في مجموعة مادية عزم دوران ، فإن اندفاعها الزاوي يبقى ثابتاً ؛ أما إذا أثر فيها عزم دوران ، فإن اندفاعها الزاوي يتغير في اتجاه عزم الدوران بمعدل يساوي مقداره ، وعزم الدوران هذا يساوي جداء المسافة العمودية بين القوتينَ اللتين تعرفان عزم الدوران في مقدار إحداهما . ويقع اتجاه عزم الدوران في اتجاه العمود على مستوي قوتيه .

ثمة نقاط بسيطة قليلة العدد تستحق الذكر ، بوجه عام ، وهي عزم الدوران والاندفاع الزاوي . فنحن نمارس ، في أكثر الأحيان ، في نشاطنا اليومي عزوم الدوران أكثر بكثير مما نمارس القوى البسيطة ، ونقوم بذلك كأننا على بينة من صيغة مقدار عزم الدوران ونطبقه لتيسير أعمالنا اليومية مثل إدارة المفاتيح في الأقفال وفتح الأبواب وإحكام غطاء قارورة وتدوير مقود السيارة ورفع الأشياء والقيام بجميع أنواع النشاط الجسماني . وما ذلك إلا لأن صيغة مقدار عزم الدوران تدلنا على أنه أسهل علينا أن ندير صمولة بوساطة مفتاح ربط Wrench طويل من أن نديرها بوساطة الإبهام والأصابع ، أو بوساطة مفتاح ربط قصير ، وهو ما نعرفه غريزياً ، لأن مفتاح الربط الأطول يعطي عزم دوران أكبر (مبدأ العتلة أو الرافعة) .

لقد استعنا منذ قليل بحركة جسيم على دائرة لإدخال فكرة الاندفاع الزاوي ، وهذا لا يعني أن الجسيم الذي يتحرك على خط مستقيم ليس له اندفاع زاوي ، بل إن له هذا الاندفاع حتى ولو تحرك بسرعة ثابتة ، ولكن ثمة فرق مهم في الاندفاع الزاوي بين نوعي الحركة هذين . فحين يتحرك الجسيم على دائرة يكون معدل اندفاعه الزاوي mvr هو نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين أينما كانوا ، في حين أن الجسيم الذي يتحرك على خط مستقيم يتعلق اندفاعه الزاوي بوضع المراقب بالنسبة إلى هذا المستقيم ، فإذا كان المراقب على مسافة y عمودياً على الخط المستقيم وكان الجسيم يتحرك بسرعة ثابتة (على هذا الخط) ، فإن اندفاعه الزاوي بالنسبة إلى هذا المراقب هو mvy ، وينقص هذا الاندفاع الزاوي كلما اقترب المراقب من المستقيم ، ويصبح صفراً عندما يكون المراقب على المستقيم . وحين يبتعد المراقب عن المستقيم إلى الجانب الآخر منه تتغير إشارة الاندفاع الزاوي ، ولكن مقداره يستمر

في الازدياد كلما ابتعد المراقب عن المستقيم. وهكذا نرى أن للجسيم المتحرك على دائرة اندفاعاً زاوياً صميمياً (ذاتياً) في حين أن الجسيم الآخر ليس له مثل ذلك.

لننظر في حركة الجسيم على خط مستقيم بسرعة ثابتة v، وأن المستقيم الواصل بين المراقب والجسيم يمسح في كل وحدة زمن مساحة مثلث تساوي $\frac{1}{2}\,v\mathrm{y}$، لأن v قاعدة المثلث و y ارتفاعه، ولكن هذه الكمية تساوي حاصل قسمة الاندفاع الزاوي للجسيم على ضعفيْ كتلته. فيتضح من ذلك إذن، أن الخط الواصل من المراقب إلى الجسيم يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية، فهذا الشرط يكافىء مبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي. وقد رأينا أن ثاني قوانين كبلر في حركة الكواكب ينص على أن الخط الواصل من الشمس إلى الكوكب يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية، فهو ينص بالتالي على أن الاندفاع الزاوي للكواكب منحفظ (أي ثابت) تحت تأثير جاذبية الشمس. وهذا ما يتضح أيضاً من أن منحى قوة جاذبية الشمس هو وفق الخط الواصل من الشمس إلى الكوكب، فلا وجود بالتالي لتأثير عزم دوران على مجموعة الشمس والكواكب.

ويرتبط بمبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي أيضاً التناظر الدوراني. وهو يعني أن قوانين الطبيعة تظل هي نفسها كيفما وجهنا مرجع المقارنة أو دورناه، وهذا يعني أن الفضاء متماثل المناحي (متناح Isotropic) أي أن هندسته هي نفسها في جميع الاتجاهات.

ولا يمكن أن يشار هنا إلى أهمية الاندفاع الزاوي في فهم قوانين الطبيعة وبنية المكان والزمان والمادة إلا في نطاق خطوط عريضة. على أن مدلوله سيتضح كاملاً عند دراستنا لنظرية الكم وبنية الذرات والنوى والجسيمات الأولية.

لقد بدأنا هذا الفصل بالإشارة إلى نوعين من المبادئ العامة التي نشأت عن قوانين نيوتن وهي مبادئ الانحفاظ ومبادئ الأصغريات، ولكننا لم ندرس من هذين النوعين سوى النوع الأول الذي مضى بنا بعيداً إلى ما وراء قوانين الحركة البسيطة في فهمنا للظواهر الطبيعية. بيد أن هذا لم يكن سوى البداية في تحويل فيزياء نيوتن من أصولها البسيطة الهزيلة إلى بنيتها الرياضية الرائعة الراقية المعقدة والتي تُعرف اليوم باسم ــ الميكانيك اللاغرانجي ــ أو أيضاً الهاملتوني (وهو ميكانيك نيوتن التقليدي بزي الرياضيات المزخرف والمزركش). وقد تطلب هذا التحويل الجمع بين مبادئ الانحفاظ التي درسناها ومبادئ الأصغريات التي سندرسها في الفصل التالي.

عصر ما بعد نيوتن
مبادئ الأصغريات وميكانيك لاغرانج وهاملتون

«سلطة ألف فردٍ في قضايا العلم لاتستوي مع مجرد التفكير البسيط عند فردٍ واحد».

ــ غاليليو غاليليه*

مفهوم الفعل

رأينا في الفصل السابق أن قوانين نيوتن في الحركة تتخذ معنى أعمق بعد إدخال مبادئ الانحفاظ الديناميكية التي تنشأ عنها وتكافئها، كما رأينا أن الكميات المنحفظة التي تتكون جبرياً من أبسط الكيانات الفيزيائية، التي تدخل في قوانين نيوتن مباشرة، يمكن أن تكون متجهات (الاندفاع والاندفاع الزاوي)، أو أن تكون سلميات (الطاقة). وسنرى في هذا الفصل، أن مبادئ الأصغريات لا تعالج إلا السلميات، فهي لذلك تتميز بخاصة حسنة هي أنها تصبح صالحة في جميع مراجع المقارنة بمجرد أن تكون صالحة في واحد منها.

كان الرياضي الفرنسي بيير دي فرما Pierre de Fermat، أول من أدخل مبادئ الأصغريات في الفيزياء في تقصيه لانتشار الضوء، في القرن التاسع عشر، في حين كان رينيه ديكارت يفترض آنذاك أن الضوء ينتشر في وسط كثيف (كالماء مثلاً) بسرعة أكبر من انتشاره في وسط مخلخل (كالهواء)، فعارضه فرما وحاجَّه بأن الضوء لو سار على هذا النحو لأخل «بمبدأ الاقتصاد»، إذ إن الحوادث في الطبيعة تتوالى تبعاً لهذا المبدأ في أقصر وقت ممكن. واستنتج فرما من دراساته لانعكاس الضوء وانكساره أن الضوء يسلك الطريق الذي يستغرق فيه أقل زمن ممكن، وهذا هو ما أصبح يعرف بمبدأ فرما أو «مبدأ الزمن الأقل» الذي يمكن أن تُستنتج منه قوانين انعكاس الضوء وانكساره. وفي القرن الثامن عشر، أدخل الرياضي الفرنسي ب. موبرْتوِي لأول مرة هذه الفكرة

* Gallileo Galilei (1564-1642) اقرأ ترجمته في الفصل (4).

العامة عن اقتصاد الطبيعة ، في الميكانيك النيوتني ، إذ بيَّن أن مبدأ الاقتصاد هذا يتحقق على أحسن وجه في الميكانيك ، ولكن ليس في زمن الانتقال بل في كميةٍ دعاها « الفعل » ، وعرّفها (خطأً) بأنها جداء المسافة التي يسيرها الجسم في سرعته .

وقد قام كل من مفهوم الفعل الحديث ومبدأ الفعل الأقل بدورٍ بالغ الأهمية في تطور الفيزياء ، لذلك لا بد لفهم هذا التطور من تعريف الفعل بكل دقة وعناية . ففي كل نقطة من مسار جسيمْ،ثمة كميتان مقيستان هما موضعه واندفاعه ، فإذا عُرفت هاتان الكميتان في كل نقطة أمكن عندئذ استنتاج مسار الجسيم من معرفة قانون القوة التي تؤثر فيه ومن قانون نيوتن الثاني في الحركة . ولما كان اندفاع الجسيم ثابتاً عملياً على امتداد مسافة ضئيلة من مساره ، لذلك يصح الحديث عن جداء هذا الاندفاع في الامتداد الضئيل على المسار ، ويدعى هذا الجداء « زيادة فعل الجسيم » . وهكذا نلاحظ أن الفعل كمية سلّمية يحملها الجسيم معه وأنها تزداد كلما انتقل الجسيم من نقطة إلى أخرى على طول مساره . ولكن هذا التعريف يختلف عن تعريف موبرْتوي للفعل إذ استعمل عبارة السرعة بدلاً من الاندفاع .

وكان موبرتوي قد أدخل مبدأ الفعل الأقل (أو الأصغري) بأن طبّق مبدأ الاقتصاد على فعل جسيم متحرك ، إذ نص على أن هذا الجسيم يختار لسيره من نقطة البداية إلى نقطة النهاية المسار الذي تكون زيادة فعله عليه في حدها الأصغر . ويُعرف هذا النص بمبدأ الفعل الأقل الذي قضى على الصعوبة في فهم التأثير عن بعد ، وهو ما يتضمنه قانون نيوتن في الثقالة والذي كان نيوتن نفسه ينفر منه ، ذلك لأن هذا المبدأ حوّل مركز الأهمية في قانون نيوتن من كيفية تأثير جسم في آخر عن بعد إلى كيفية استجابة كلٍ من الجسمين إلى خاصة معينة (الفعل) هي خاصة جيرته أو مساره . فكأن كل جسم أو جسيم ينظر في كل المسارات المحتملة الممتدة أمامه ثم يختار من بينها ذاك الذي يتغير عليه فعله بأقل كمية ممكنة . فكانت هذه النتيجة بداية مفهوم حقل القوة الذي كان له فضل كبير في تطور النظرية الكهرطيسية والنسبية العامة وفيزياء الجسيمات العالية الطاقة وفي الكونيات (الكوسمولوجية) .

ولم يبق مفهوم الفعل ومبدأ الفعل الأقل على ما كانا عليه ، بل وسعهما ومدهما وعممهما الرياضي والرياضي الفيزيائي الإيرلندي الشهير ولْيم رُوان هاملتون W.R.Hamilton ، ولم يعد يقتصر تطبيقهما على مسارات الجسيمات بل تعداها إلى انتشار الضوء وسلوك مجموعات معقدة من الجسيمات والحقول (كالحقل الكهرطيسي والثقالي) . ولكن لنُشر قبل أن ندرس إسهام هاملتون العظيم إلى استنتاج مهم ينشأ عن مفهوم الفعل بعد حصره ضمن شرط معيّن ، إذ يفترض ميكانيك نيوتن ضمناً أن الظواهر الطبيعية ممتدة امتداداً مستمراً في المكان وفي الزمان ، وأنه يمكن متابعة كل عملية مثل حركة جسيم على مساره بتفصيل ودقة لا حدود لهما . ويصح هذا الافتراض إذا كان

باستطاعة المرء أن يقيس أو يرصد باستمرار وضع هذا الجسيم واندفاعه بدقة وفي كل نقطة من مساره. ولا ضرورة، لو أمكن هذا، إلى متابعة حركة الجسيم بالتفصيل للحصول على مساره، لأن معادلات نيوتن في الحركة ـــ إذا ما ضُم إليها معرفتنا وضع الجسيم واندفاعه في نقطة واحدة من مساره ـــ تعطينا كامل مساره بعد ذلك إلى الأبد.

ولا تصح هذه النتيجة إلا إذا كانت جميع الكيانات الفيزيائية قابلة لأن تُقسم إلى أجزاء لا حدود لصغرها لكي يمكن ملاحظة أجزائها أو قياسها مهما بلغت من الصغر. أما إذا كانت قابلية التقسيم هذه محدودة فإن هذه الملاحظة وهذا القياس لا يصحان، فمثلاً إذا كان الفعل يتغير في أثناء عمليةٍ ما بكميات صغيرة ولكنها محدودة مثل h (وليس أبداً أقل من h)، بدلاً من أن يتغير باستمرار، فإن مسار الجسيم عندئذ لا يمكن أن يتعين بدقة؛ والسبب في ذلك أنه لتعيين المسار بدقة علينا أن نعرف بدقة أيضاً اندفاع الجسيم ووضعه في النقطة نفسها. ولكن الفعل هو جداء اندفاع الجسيم في المجال المكاني الذي نقيسه والذي يجب أن يكون صغيراً جداً (بقدر ما نريد) إذا أردنا أن نعرف موضع الجسيم بدقة. بيد أننا إذا فعلنا ذلك، أصبح الجداء الذي يعرِّف الفعل صغيراً جداً، ومن ثم أصغر من الجداء الأدنى المباح h، اللهم إلا إذا أصبح الاندفاع لا نهائياً فنفقد عندئذ كل معرفة عنه، أو بعبارة أخرى: إذا كانت تغيرات الفعل تتم على دفعات (أي إذا كان كمومياً Quantized)، فإننا لا نستطيع أن نعرف عندئذ وضع الجسيم واندفاعه في آن واحد، وهذه نتيجة سنرى كامل مدلولها في الفيزياء عند دراستنا نظرية الكم.

مبدأ الفعل الأصغري عند هاملتون

ولد السير ولْيم روان هاملتون (1805-1865) في دبْلِن عاصمة إيرلندا. وقد أظهر منذ طفولته قدرات عقلية غير عادية دفعت والده لأن يُلقي بمسؤولية تربيته على عاتق أخيه البكر الكاهن جيمْس هاملتون الذي كان عضواً في الأكاديمية الملكية الإيرلندية. فأرسل ولْيم قبل أن يُكمل الثالثة من عمره إلى مدينة تيم Tim قرب دبلن ليعيش هناك مع عمه الذي كان يعمل آنذاك مدرساً في مدرسة الكنيسة الإنكليزية، وقد ظل وليم مع عمه حتى دخل كلية ترينيتي Trinity في دبلن عام 1823.

وبعد وصول هاملتون إلى منزل عمه بقليل تعلم قراءة اللغة الإنكليزية وإنجاز حسابات معقدة. وفي الخامسة من عمره، كان يستطيع أن يترجم عن اللاتينية واليونانية والعبرية كما كان يستطيع أن يلقي فقرات طويلة من أعمال مؤلفين مبدعين تتدرج أسماؤهم من هوميروس إلى ملتون[1]. وفي السنوات الخمس التالية أصبح مطّلعاً بعمق على السنسكريتية، كما تعلم وحده العربية والكلدانية وعدداً من اللهجات الهندية، وتمكن من الإيطالية والفرنسية. وقبل أن يتجاوز الثانية

عشرة من عمره صنف كتاباً في قواعد السريانية ، وبعد عامين أصبح متقدماً في دراسة الفارسية حتى أنه استطاع أن يكتب كلمة ترحيب بصاحب مقام رفيع زائر من العجم[1] .

ولم يبدأ اهتمام هاملتون بالرياضيات إلا في عام 1820 عندما التقى بأميركي يدعى ز . كولبورن Z.Colburn كان يستطيع أن يجد ذهنياً حلول مسائل تتضمن أعداداً كبيرة جداً[1] ، فأثارت فضوله فائدة الرياضيات مما جعله ينغمس في مؤلفات علمية تقليدية (كلاسيكية) مثل كتاب المبادئ (برنسيبيا) لنيوتن ، وكتاب لابلاس في الميكانيك السماوي . وكان من جراء اكتشافه خطأً منطقياً في هذا الكتاب الهام أن اجتذب إليه انتباه أستاذ للفلك في كلية ترينيتي وهو ج . برِنْكلي J.Brinkley كما أن نمو قدرة هاملتون في الميكانيك التقليدي قادته إلى الاهتمام بالبصريات ، فأنجز أول نشرة علمية في البصريات الهندسية في عام 1824 وهو لا يزال طالباً في كلية ترينيتي ، وقدمها إلى الأكاديمية الملكية الإيرلندية لنشرها . وكانت هذه النشرة على درجة عالية من التجريد الرياضي حتى أن أعضاء الأكاديمية لم يفهموها حق الفهم ، فطلبوا من هاملتون أن يبرهن على صحة مكتشفاته ، فاتبع نصيحتهم وأنجز مشروعه وهو لا يزال طالباً غير مجاز . وفي عام 1827 تقدم رسمياً بنشرته : « عرضٌ لنظرية في منظومات الأشعة » إلى الأكاديمية ، « فكان هذا العرض واحداً من الأعمال الكلاسيكية العظيمة في الفيزياء النظرية الذي ظل أساساً لمعظم المؤلفات في البصريات الهندسية ، وكان يحوي علاوة على ذلك بذور الفكرة التي قادت هاملتون بعدئذ إلى صياغته الشهيرة للديناميك (التحريك) . فقد أدخل هاملتون في هذه النشرة الدالَّة المميِّزة لمجموعة من الأشعة ، وهي دالة يمكن أن تُستنتج منها خواص المنظومة كافةً بعمليات رياضية بسيطة كعملية التفاضل مثلاً . وتأتي أهمية هذه الدالة من أنها مرتبطة مباشرة بتكامل الفعل الذي يقوم بالدور الأول في ديناميك هاملتون ، والذي انطلق منه شرْدونغر لاشتقاق معادلاته الموجية »[2] .

وقد أدت نشرة هاملتون إلى ذيوع شهرته كفيزيائي رياضي لأنها أرست موضوع البصريات الهندسية في الرياضيات بأن بَيّنتْ أنه يمكن حل مسائل هذا الموضوع كافةً بالطريقة المنتظمة الفريدة التي قدمها هاملتون[3] . وحين تخلى جون برِنْكلي عن منصب أستاذ الفلك في كلية ترينيتي لم يكن هاملتون قد تخرج بعد، فرُشِّح بسبب ألمعية نشرته إلى هذا المركز الشاغر على الرغم من أنه كان في الواحدة والعشرين ، فقبِل هذا المنصب ونذر نفسه لبحوثه في الرياضيات والفيزياء والفلك إضافة إلى القيام بواجباته التعليمية ومسؤولياته اليومية العملية والعادية في إدارة المرصد[4] .

وفي عام 1834 كوفىء هاملتون على اكتشافه للدوال (التوابع) المخروطية ، إذ منحته الأكاديمية الملكية الإيرلندية ميدالية كونينغهام Cunningham ، كما منحته الجمعية الملكية الميدالية الملكية . وبعد ذلك بثلاث سنوات أصبح رئيساً للأكاديمية الملكية الإيرلندية ، وظل في هذا المنصب ثماني سنوات . وفي أثناء ذلك حقق أهم أعماله في الفيزياء الرياضية، الذي نُشرت نتائجه في عام 1835 في

نشرة شهيرة بعنوان «طرائق عامة في الديناميك». «وقد طبق فيها فكرته السابقة وهي (الدالة المميَّزة) على حركة منظومات من الأجسام وعبّر عن معادلات الحركة بصورة أظهرت المثنوية بين مركبات اندفاع منظومة ديناميكية وبين الإحداثيات التي تعيّن وضعها»[5]. وتطورت المعادلات باستخدام ما يدعى «الدالة الهاملتونية» التي أسهمت إسهاماً كبيراً في تطوير نظرية الكم. ويمكن شرح هذه الدالة على النحو التالي: «لنفرض أن لدينا منظومة ــ ولتكن جسيماً ــ تتحرك في حقل قوة، فنستطيع عندئذ أن نكتب طاقة هذه المنظومة الكلية (الحركية والكامنة) بدلالة مركبات الاندفاع والإحداثيات. إن هذه العبارة هي ما يُدعي هاملتوني المنظومة؛ ويمكن الحصول عندئذ على المعادلة التي تصف حركة المنظومة من هذه الكمية (الهاملتوني) بإجراء بعض العمليات الرياضية. وتتميز هذه الصياغة الديناميكية بأنها يمكن أن تطبّق على المنظومات المعقدة جداً فيما لو أُحسن اختيار الإحداثيات»[6].

وقد أدت دراسات هاملتون في الجبر أيضاً إلى اكتشافه الرباعيات Quaternions (وتسمى أيضاً الأعداد فوق العقدية Hypercomplex numbers)؛ وهي كيانات رياضية تساعد على إجراء حسابات جديدة كل الجدة، وما ذلك إلا لأن هذه الرباعيات تسلك سلوك الأعداد، ولكنها ليست أعداداً، لأنها تشذ عن قانون التبديل Commutative law ($a x b = b x a$) الذي يصح في الأعداد العادية. وهكذا حرر هاملتون الجبر من مسلّمة التبديل في الضرب واستطاع بذلك أن يقدم الأداة القادرة على دراسة «الكميات التي لها مقدار واتجاه في الفضاء الثلاثي الأبعاد»[7]. وختم هاملتون بهذا الاكتشاف في عام 1843 خمسة عشر عاماً من الجهد الذي بذله لكي يجد طريقة لضرب المتجهات، وهي مسألة نشأت عن جهود موبيوس Möbius لكي يجمع نقاطاً مع قوى. وقد خطر الجواب عن هذه المسألة في ذهن هاملتون بومضة من ومضات الإلهام والبصيرة حين كان يتمشى مع زوجته بقرب القنال الملكي في طريقه إلى أحد اجتماعات الأكاديمية في دبلن، «فلم يستطع أن يقاوم رغبته في أن ينقش بسكينه على حجر جسر بروغام Brougham، وكانا مارّين عليه، الصيغة الأساسية $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$، وهي دلالة الرباعيات التي أعطت حل المسألة»[8]. ولكن رباعيات هاملتون هذه ظلت زمناً طويلاً بدون أن تُستخدم كثيراً في الرياضيات التطبيقية على الرغم من أن لها تأثيراً هاماً في الجبر الحديث، والسبب في ذلك أن ج. و. جيبْس J.W.Gibbs كان قد طور منهجه الأبسط في التحليل المتجهي.

وقد أمضى هاملتون العقدين الأخيرين من حياته وهو يكتب أعمالاً في الرياضيات توجهت نحو مسائل في الجبر وحساب الاحتمالات ونظرية المعادلات ونظرية الدوال. ومع أن أعماله كانت تتميز بحدس عميق فإن نشراته كانت مفصلة في عرضها الرياضي وكان تفكيره المنطقي فيها واضحاً ودقيقاً. وكان في الوقت نفسه رجلاً شديد التدين جرّب أن يثبت وجود أساس ميتافيزيائي لِاكتشافاته الرياضية حين حاول أن «يستمد جبراً من عنصري المكان والزمان وأن يجعل منه علماً

بدلاً من أن يكون أحد فروع الرياضيات »[9] . وكان هاملتون حسن الاطلاع على أعمال جورج بيركلي George Berkeley وعمانويل كنط Immanuel Kant ، وكان منهجه الفيزيائي نحو العلم شديد التأثر بديكارت ونيوتن . وكان مثل نيوتن متديناً ورعاً حتى أنه رفع مكانة الحياة الروحية فوق مكانة كلٍ من العلم والرياضيات . ولم يكن أيٌّ من الرجلين يرى خللاً في نظام كهذا لأنهما كانا يريان أن الرياضيات هي الأداة الوحيدة التي تستطيع أن تظهر جمال الديناميك الرائع في هذا العالم الذي كان كل منهما يعتقد بأنه من صنع إله مبدع .

بدأ هاملتون بحوثه في ديناميك الأجسام المتحركة بأن حلل انتشار الضوء مثلما عبر عنه فرما بمبدأ الزمن الأصغري ، ولاحظ أوجه الشبه بينه وبين مبدأ موبرتوي أي مبدأ الفعل الأصغري فيما يتصل بمسارات الجسيمات ؛ فأشار ، بعد أن أوضح هذا الأمر ، إلى التماثل الكبير بين البصريات والديناميك ، وطوّر هذا التماثل الذي اتخذ منه شرودنغر بعد سنوات عديدة نقطة انطلاق لإنشاء ميكانيك الجسيمات الموجي : وهذا هو أحد الأمثلة البارزة في تاريخ الفيزياء على العلاقة المتبادلة بين فروعها المختلفة كما سيتضح ذلك أحسن وضوح عند دراستنا لميكانيك الكم .

وقد أشار هاملتون إلى أن علم البصريات كان قد تطور في طريقين مختلفين : يقوم أحدهما على انتشار الأشعة وفق خطوط مستقيمة أسماها « نظرية مجموعات الأشعة » (وهي التي ندعوها اليوم البصريات الهندسية) ، ويقوم الآخر على الانتشار التموجي (الذي نسميه اليوم البصريات الفيزيائية) . وحين نظر في بصريات الأشعة أثاره التشابه بين مبدأ فرما ، مبدأ الزمن الأصغري ، الذي تتبعه أشعة الضوء ومبدأ موبْرتوي ، مبدأ الفعل الأصغري الذي تسلكه الجسيْمات ؛ فاقتنع بأن بالإمكان تطوير نظريةٍ ضوئية هندسية للديناميك يمكنها أن تدمج قانوني البصريات والديناميك وتمثلهما في مبدأ واحد يكون مبدأ الفعل الأصغري . وكان دليله في تطوير هذه الفكرة إعجابه الشديد بعمل لاغرانج في الديناميك كما عرضه في كتابه « الميكانيك التحليلي » .

وقد وصف هاملتون هذه الأفكار في نشرة علمية شهيرة نُشرت في مجلة جامعة دبْلن عام 1833 ، تتضمن بحثاً هو « طريقة عامة للتعبير عن مسارات الضوء والكواكب بمعاملات دالة مميزة » وقدم لعمله آنذاك بالنص التالي :

إن أولئك الذين تأملوا في جمال طريقة لاغرانج العامة وفائدتها في الميكانيك النظري ، أو أولئك الذين أحسوا بقدرة ومكانة هذه النظرية الديناميكية الأساسية التي استنتجها منها في كتابه « الميكانيك التحليلي » حين جمع مبدأ السرعات الافتراضية إلى مبدأ دالامبير D'Alembert ، أو أولئك الذين قدّروا البساطة والانسجام اللذين أدخلهما في بحثه عن الاضطرابات الكوكبية باستخدام فكرة تغيير الوسطاء وتفاضلات الدوال المشوشة ؛ هؤلاء لا بد أنهم شعروا جميعاً بأن البصريات الرياضية يمكن أن تتوصل حينئذ بعمل كهذا إلى مستوى التنسيق مع الميكانيك الرياضي أو مع الفلك الديناميكي في جمالٍ وقوةٍ وانسجام ، أي عندما تملك طريقة مناسبة وتصبح فكرة أساسية واضحة كل الوضوح .

لقد فرض هذا الخلل الأساسي نفسه على تفكيري منذ أمد بعيد، كما كانت لدي مذ ذاك طريقة يبدو معها أن هذا الخلل قد زال، ولكن عندما كنت أفكر على هذا النحو كنت أشعر بخطر التحيز، فقد يحدث لي، كما يحدث للآخرين، أن يتخذ التأمل الذي مضى زمن على التمعن فيه، أهمية غير واقعية، وأن تكتسب الطريقة التي اتُّبعت مدة طويلة صورة السهولة في المظهر فحسب. لذلك عليّ أن أدع للآخرين ليحكموا إلى أي مدى من النجاح بلغت محاولاتي وإلى أي مدى يطلبون إكمالها (أو إهمالها) عندما يتقدم العلم في المستقبل.

ويبدو لي في غضون ذلك أنه إذا كان يوجد أصلاً طريقة عامة في البصريات الاستنتاجية يمكن الوصول إليها فلا بد أن تُستنتج من قانونٍ أو مَبدأٍ هو نفسه على أعلى درجة من العمومية ونتيجة من أسمى نتائج الاستقراء. ولكن ما هي البديهية التي نستطيع أن نقول عنها عندئذ إنها البديهية الأسمى والأعم (بالمعنى البيكوني) التي توصلت إليها البصريات الاستقرائية عند مراعاتها قواعد خطوط المعلومات المرئية والضوئية وشروطها؟ إن الجواب، على ما أعتقد، يجب أن يكون ذلك المبدأ أو القانون الذي يسمى عادة قانون الفعل الأصغري الذي استُوحي من وجهات نظر غير مؤكدة ولكنها بنيت على أوسع استقراء شمل كل تركيب معروف من الأوساط وكل خط مستقيم أو منكسر أو منحنٍ، عادي أو غير عادي يبسط الضوء (أياً كان الضوء) تأثيره فيه على التوالي في المكان وفي الزمان؛ وأعني بذلك أن ما وُجد دائماً هو أنه إذا قورن هذا المسار الخطي للضوء من نقطة إلى أخرى بمختلف الخطوط الأخرى اللانهائية التي يمكن أن تصل بين النقطتين نفسيهما فكرياً وهندسياً، فإن ثمة مجموعاً أو تكاملاً يدعى غالباً «الفعل»، يكون على هذا المسار أصغر من التكاملات مثيلاته على الخطوط المجاورة الأخرى كلها، أو يملك على الأقل قيمة استقرارية بالنسبة إليها؛ وهو يتعلق، بحسب قواعد ثابتة، بطول المسار الذي يقطعه وبهيئته ووضعه وبالوسط الذي يجتازه الضوء؛ فيمكن تسمية هذا القانون بقانون الفعل الاستقراري. ويبدو لنا أنه يمكننا عندئذ أن ننطلق منه على أنسب وجه وبأفضل أمل لإجراء عملية الاستنتاج التحليلية والبحث عن طريقة رياضية.

وهكذا فقد استنتجت منذئذ من هذا القانون المعروف، قانون الفعل الأصغري والاستقراري مبدأ آخر يرتبط به وله مثل شموله، ويمكن أن ندعوه بالمثل قانون الفعل المتغير الذي يبدو أنه يقدم بصورة طبيعية طريقة كالطريقة التي نبحث عنها...(10)

إذن لقد كان قانون الفعل الأصغري، في رأي هاملتون الذي ضمّنه مبدأ فرما في الزمن الأصغري، يقف في رأس القوانين الطبيعية كلها وكان مدخلاً للتوحيد في الفيزياء. ولكي يحصل هاملتون على مبدأ بسيط يشمل كلا الظاهرتين، الضوئية والميكانيكية، انطلق من مبدأ فرما وبيّن أنه يمكن أن يُستبدل به مبدأ قريب الشبه جداً بمبدأ مربرتوي في الفعل الأصغري. وقد توصل إلى ذلك بأن عوّض عن الزمن في مبدأ فرما بطول المسار الذي يجتازه الشعاع بين نقطتين في أي وسطٍ مقسوماً على سرعة الشعاع في ذلك الوسط، وهذا يكافىء ضرب المسافة التي يسيرها الشعاع في الوسط بقرينة إنكساره عند كل نقطة من مسار هذا الشعاع، وهذا الجداء الذي يسمى اصطلاحاً «المسار الضوئي» هو الذي يجب أن يكون استقرارياً. وبيّن هاملتون، بهذه الطريقة، أن مبدأ فرما

يشبه صورياً مبدأ موبرتوي في الفعل الأصغري.

وقد حصل هاملتون بعد إنجاز هذا العمل على تركيب رائع لقوانين البصريات الهندسية وقوانين نيوتن في الحركة، أصبحت فيه قرينة الانكسار في نقطة ما من وسطٍ ما هي التي تعيّن سرعة الضوء في هذه النقطة، حتى يمكن القول إنها تقوم، إلى حد ما، بالنسبة إلى الضوء مقام حقل القوة بالنسبة إلى الجسيم الذي يتحرك فيه. وهكذا كانت أوجه الشبه بين مبدأ فرما في البصريات الهندسية ومبدأ موبرتوي في الفعل الأصغري في المنظومات الديناميكية هي التي قادت هاملتون إلى تلك الفكرة القائلة بأنه يمكن وصف سلوك الجسيمات بنوعٍ من الميكانيك الموجي. وقد بيّن أن مسارات الجسيمات التي لها كمية الطاقة الكلية نفسها تتطابق مع مسارات أشعة الضوء في وسط له قرينة الانكسار المناسبة، أو بعبارة أخرى: يمكن أن نجد، وفقاً لرأي هاملتون، قرينة انكسار مناسبة يمكن بوساطتها وصف مسار أي جسيمٍ بمسار شعاع ضوئي في وسط له قرينة الانكسار المعينة نفسها. ومع ذلك، لما كانت الأشعة مجرد تقريب للوصف التموجي الصحيح للضوء (وهو وصف يصبح أكثر دقة كلما صغر طول الموجة)، فإن المسارات النيوتنية بالمقابل هي مجرد تقريب لوصف حركة الجسيم وصفاً تموجياً. ومثلما أن أشعة الضوء في البصريات تتعامد مع جبهات الموجات (أي سطوح تساوي الطور)، فكذلك تتعامد مسارات الجسيمات في الميكانيك مع جبهات موجاتٍ من نوعٍ آخر هي (سطوح تساوي الفعل). أو بعبارة أخرى، يقوم الفعل في ميكانيك الجسيم الموجي بدور الطور في البصريات، وهذه الشكلية الهاملتونية هي بالتحديد ما احتاجها الانتقال من ميكانيك الجسيم التقليدي إلى ميكانيك الكم الموجي، حتى لقد استخدمها شرودنغر بكاملها تقريباً.

نستطيع الآن أن نلخص إسهام هاملتون العظيم في الديناميك التقليدي: لنفرض أن لدينا جسيماً يتحرك في حقل قوة، فيمكننا تبعاً لطريقة هاملتون أن نصف مساره كما لو أن هذا الجسيم شعاع ضوئي يسير في وسط ضوئي ترتبط قرينة انكساره ارتباطاً محدداً بحاصل القوة الذي يتحرك فيه الجسيم. وهكذا يمكن للمرء أن يخمّن من هذه الفكرة ما لم يخمّنه هاملتون ولكن شرودنغر خمّنه، وهو أنه: كما أن الشعاع في البصريات الهندسية لا يصف الضوء إلا وصفاً تقريبياً فكذلك يصف الديناميك التقليدي حركة الجسيم وصفاً تقريبياً أيضاً، وكما أن للشعاع الضوئي موجته الضوئية المتممة له فكذلك للديناميك وجه موجي — ديناميكي.

وإذا قارن المرء ديناميك نيوتن بالبصريات التقليدية فإنه يبدو له أن الديناميك يصف نصف الصورة فحسب. ففي حين بدت البصريات في صورتين مختلفتين هما الصورة الجسيمية (نيوتن) والصورة الموجية (هويغنز) نجد أنه لم يكن للديناميك أي وجه موجي على الإطلاق. وهذا أمر لا يقبله رجل مثل هاملتون لديه اعتقاد مهووس بوحدة الطبيعة، فكان يرى أنه خلل في فيزياء نيوتن

يجب الخلاص منه. فبدأ أول خطوة في هذا الاتجاه بأن وسع مفهوم الفعل لكي يشمل انتشار الضوء.

وقد لجأ هاملتون عند سعيه لإيجاد مبدأ عام في الفعل إلى توسيع مبدأ موبرتوي كي يؤخذ بالحسبان اندفاع الجسيم وطاقته في أثناء حركته، وبدلاً من أن يعرِّف الفعل على مدى مسافة قصيرة من مسار الجسيم بأنه جداء اندفاعه بهذا المدى القصير من مساره، اعتبر حركة الجسيم في غضون مدة زمنية صغيرة جداً، وعرّف فعله بأنه جداء هذه المدة الزمنية الضئيلة بكيان يدعى «اللاغرانجي»، وهو كمية كان قد أدخلها لاغرانج في ميكانيك نيوتن المعمم، وقيمتها بالنسبة إلى جسيم تساوي فحسب طاقته الحركية مطروحاً منها طاقته الكامنة. فيمكن بالتالي استخدام تعريف هاملتون للفعل لوصف حركة الجسيمات في حقل قوة بدلالة طاقتها الكامنة. وهكذا أصبح الفعل الهاملتوني في حالة جسيم مفرد يساوي جداء اندفاع الجسيم في المسافة الضئيلة من مساره (فعل موبرتوي)، مطروحاً منه جداء طاقة الجسيم الكلية في الزمن الضئيل الذي أمضاه في قطع المسافة الضئيلة من مساره، أو يمكن التعبير عن ذلك كما يلي:

(الاندفاع × المسافة) ــ (الطاقة × الزمن) = فعل موبرتوي ــ (الطاقة × الزمن)

إن ربط اندفاع الجسيم بالمكان وطاقته بالزمان في تعريف هاملتون للفعل يتميز بأمرين: فهو يُظهر أن قياس اندفاع الجسيم على مساره مرتبط بطريقة ما بقياس موضعه فهو بذلك يستبق ميكانيك الكم، وهو يشير كذلك إلى أنه يجب أن يأتي الاندفاع مع المكان والطاقة مع الزمان حين نستخدم كميات مثل الفعل لوصف المنظومات الفيزيائية، وفي ذلك استباق للنظرية النسبية التي جمعت المكان مع الزمان في متصل مكاني ــ زماني واحد.

إسهامات لاغرانج

ولد الرياضي الفرنسي ــ الإيطالي جوزيف ــ لويس كونت دي لاغرانج (1736-1813) J.L.Comte de Lagrange في مدينة تورينو بإيطالية، من أسرة ثرية لها بعض الأصول الإيطالية النبيلة. وكان والده أمين الخزينة عند ملك سردينية، ولكن الأسرة سرعان ما فقدت ثروتها بعد أن استثمرتها بالمضاربة؛ فانكب جوزيف، معتمداً على موارده الخاصة، على دروسه في المدرسة ولا سيما على الشعراء الكلاسيكيين اليونانيين والرومانيين من أمثال هوميروس وفيرجيل. ولم يكتشف أن ميله الحقيقي يتجه نحو الرياضيات إلا بعد أن قرأ مصادفة إحدى مذكرات إدموند هالي، فراح يقرأ كل بحث رياضي استطاع أن يعثر عليه. ولم يلبث أن تمكن من هذا الموضوع، حتى أنه أصبح معلماً للرياضيات في مدرسة المدفعية الملكية في تورينو، وكان عمره آنئذ 19 عاماً. وقد بلغ تحكمه

في موضوعه من الاكتمال حداً استرعى انتباه أكثر الأساتذة القدماء تشكُّكاً ، على الرغم من طريقة حديثه غير المؤثرة . ولقد كسب بشخصيته غير المتعالية وبحماسه للرياضيات احترام زملائه وأصبحت هذه المجموعة من العلماء الأعضاءَ الأوائل في أكاديمية علوم تورينو التي يرجع الفضل الأكبر في تأسيسها إلى لاغرانج . وكانت موهبته العظمى تقوم ، من ناحية ثانية ، على بحوثه في الرياضيات : « فكانت هيئة لاغرانج تتبدل حين يكون القلم في يده ، بل إن كتاباته ، منذ البداية ، كانت الأناقة ذاتها . وكان ينقل إلى الرياضيات كل تلك الموضوعات الصغيرة عن الأسئلة الفيزيائية التي كان أصدقاؤه يحملونها إليه . فكان في ذلك أشبه ما يكون بشوبرْت حين كان يلحن موسيقى كل قافية نابية تستهويه »[11] .

وقد لفت لاغرانج انتباه الرياضيين الأوربيين في بادئ الأمر حين حل ما سُمِّي « مسألة المحيطات المتساوية » التي حيّرت الرياضيين ما يقرب من نصف قرن ، فأرسل حلها إلى ل . أولر L.Euler ، الذي كان آنذاك أشهر رياضيي أوربة ، وكان قد وصل إلى نتيجة مماثلة ، ومع ذلك فقد تخلى بدماثة عن كامل حق الاكتشاف للاغرانج . وكان هذا قد ابتكر لحل هذه المسألة نوعاً من الحساب يسمى « حساب المتغيرات » الذي أصبح تطويره مركز اهتمام لاغرانج وكان ذا أهمية حاسمة بالنسبة إلى مفهوم الاقتصاد في الطبيعة (ومنه مبدأ الفعل الأصغري) ، حتى لقد أثر مبدأ الأصغريات هذا في عمل هاملتون وجيمس كلارْك مكسويل وألبرْت أينشتاين ، وما زال وثيق الصلة بكل مجالات الفيزياء الحديثة .

وقد ثابر لاغرانج على إنجاز اكتشافات هامة في الرياضيات ، فاعتُرف به على أنه أحد كبار الرياضيين الموهوبين في أوربة ، وكان بخلاف لابلاس يعترف بإسهام الآخرين بصورة لبقة ، ولكنه كان قادراً كذلك على اكتشاف أدنى خطأ في أعمالهم بما فيها عدة أخطاء ارتكبها نيوتن نفسه . وقد اعترف له جميع معاصريه بمهارته من دون تحفظ ، حتى لقد عُد في نهاية حياته وعلى نطاق واسع أعظم رياضي في أوربة على قيد الحياة .

وفي عام 1764 تلقى من أكاديمية علوم باريس جائزة على مقالته « عن تمايل القمر ، أي الاهتزاز الظاهري الذي يسبب تغيرات طفيفة في وضع ملامح القمر على الوجه الذي يقابل به الأرض »[12] . إذ إن ابتكار لاغرانج للمعادلة التي تحمل اسمه ساعد على حل هذه المسألة . ثم تلقى بعد عامين جائزة أخرى من الأكاديمية على مقالته في نظرية حركات أقمار المشتري . وفي العقد التالي نال ثلاث جوائز أخرى على مقالاته الواضحة المبرَّرة بدون زلل في الرياضيات . « وفي عام 1776 رحل لاغرانج إلى برلين تلبية لدعوة من فريدريك الأكبر الذي عبَّر عن رغبته (في أن يكون أعظم رياضي في أوربة في بلاط أعظم ملك فيها) ، فعيِّن لاغرانج في المركز الذي تخلى عنه أولر في الأكاديمية ، وذلك بعد توصية من أولر نفسه ومن الرياضي الفرنسي جِ . دالامْبير »[12] .



جوزيف ـــ لويس كونت دي لاغرانج (1736 - 1813)

ولم يغير تعيين لاغرانج في البلاط كثيراً من شخصيته غير المتعالية، بل ثابر على نظام دراسته الأكاديمية المنهكة إلى أن أصيب بعدد من الأمراض نتيجة افتقاره إلى الراحة، فوجه له فريدريك نفسه بعد ذلك نصيحة عن حاجته لأن يخفف من برنامج عمله المضني، ويبدو أن لاغرانج أخذ بنصيحة ولي نعمته، لأنه «غيَّر من عاداته، وصار يضع، في كل ليلة، برنامجاً لما يجب عليه أن يقرأه في اليوم التالي، دون أن يزيد ما خصص له أبداً»[13]. وأمضى لاغرانج 20 عاماً في بروسية كتب فيها عدداً كبيراً من البحوث الرياضية البارزة التي جمعها بعد ذلك في كتابه «الميكانيك التحليلي». وكان من بين أعماله «بحوث في مسألة الأجسام الثلاثة التي تعالج تولد مدارات ثلاثة جسيمات تتجاذب وفقاً لقانون نيوتن في الثقالة. ومن أعماله أيضاً بحوث في المعادلات التفاضلية وفي نظرية الأعداد الأولية وفي المعادلة الأساسية في نظرية الأعداد التي قُرنتْ باسم جون بل John Pell (وخطأ باسم أولر)، وفي الاحتمالات والميكانيك واستقرار المنظومة الشمسية»[14].

وبعد وفاة فريدريك غادر لاغرانج بروسية تلبية لدعوة لويس السادس عشر بأن يأتي إلى باريس. وعلى الرغم من أنه أُعطي هناك شقة للسكن وعدداً من المكافآت، فقد ظلت سنتاه الأوليان في فرنسا مجدبتين لأن ولعه بالرياضيات فارقه هناك ظاهرياً حال وصوله، فكان يبدو لأصدقائه

شارداً غير مبالٍ ؛ فمن الجائز أن تكون السنوات العديدة من الجهود المستمرة في الرياضيات قد أرهقت عقله . وهكذا التفت لاغرانج إلى موضوعات أخرى تتضمن الميتافيزياء والفلسفة والكيمياء ، كما أنه لم يبدِ اهتماماً كبيراً حين نُشر كتابه « الميكانيك التحليلي » في عام 1788 حتى أنه لم يفتح نسخة الطبعة الأولى إلا بعد عامين . ومهما يكن من أمر ، فقد كان كتاب لاغرانج متميزاً بأنه « تركيب لبحوث في الميكانيك استمرت مئة عام بعد نيوتن . ويستند هذا التركيب إلى حساب التغيرات الذي ابتكره لاغرانج والذي يستدل فيه على بعض خواص المنظومات الميكانيكية من ملاحظة تغيرات المجموع (أو التكامل) التي تنشأ عن إزاحات يمكن تصورها (أو افتراضها) عن المسار الذي يصف تاريخ المنظومة الراهن »[14] . كما يتضمن هذا الكتاب استخدام الإحداثيات المستقلة (أو الإحداثيات المعممة) الضرورية لتعيين أوضاع الجسيمات في منظومة معقدة إضافة إلى معادلات لاغرانج (بدلاً من معادلات نيوتن) التي تربط (اللاغرانجي) أي الطاقة الحركية مطروحاً منها الطاقة الكامنة (محسوباً وفقاً لنظام ميكانيكي تقليدي) بالإحداثيات المعممة ، والقوى المعممة الموافقة لها ، والزمن[14] .

لم يترك اندلاع الثورة في فرنسا أثراً مباشراً في لاغرانج ، إلا أن عدداً من أصدقائه هجروا البلاد وظل هو يعامَل معاملة حسنة من الحكومة في تلك الفترة المضطربة ، ومع ذلك فقد دفعه قطع رأس الكيميائي الشهير أ . ل . لافوازييه A-L.Lavoisier إلى التساؤل إن أصبحت أيامه هو أيضاً معدودة . غير أنه بقي في باريس على الرغم من الخطر المحدق به وسخّر ما لديه من طاقة للجمعية التي كانت قد جُمعت لإصلاح النظام المتري الذي أصبحت في تسميات النقود والأوزان والقياسات مبنية منذ ذلك الحين حصراً على مضاعفات العدد عشرة . ثم تخلص لاغرانج منذ عام 1791 من شروداته العقلية عن الرياضيات ، وبدأ ينتج من جديد عدداً من البحوث في موضوعات ومسائل مختلفة .

لم يترك لاغرانج أي مجالٍ تقريباً من الرياضيات في سنوات عمره المديد إلا وأسهم فيه إسهاماً نادر المثال . إذ قلما نجد بين العلماء من يجاريه في أصالة كتابته وعظمتها أو حتى في كمية إنتاجه الصرف . وتتدرج اهتماماته ما بين ميكانيك نيوتن التقليدي إلى نظرية فرما في الأعداد . كما أوحت أعماله لكثير من الرياضيين البارزين في أن يكملوها ، منهم لابلاس وفورييه ومونْج Monge ولوجنْدر Legendre وكوشي Cauchy[15] . فوضع لابلاس الخطوط العريضة في التصميم الذي غدا رياضيات حديثة تاركاً التفاصيل ليملأها معاصروه أو من أتى بعده ، أي على طريقة نيوتن الذي وضع أساس الفيزياء التقليدية بقوانينه الثلاثة في الحركة وبنظريته في الثقالة مقدماً بذلك « الحجارة والملاط » ليُبنى بها لاحقاً صرح عقلي عظيم . وكان لاغرانج أحد هؤلاء الذي وجدوا في التصورات الرياضية الرائعة التي صاغها نيوتن مصدر وحيهم الأكبر ؛ فمن المفيد أن ننظر إذن كيف طور لاغرانج إسهاماته الخاصة من أعمال نيوتن .

تعالج معادلات نيوتن معالجة واضحة حركات جسيمات فردية خاضعة لقوى خارجية ولتأثيراتها المتبادلة بحيث يغدو الوصف النيوتني الكامل لحركات زمرة من هذه الجسيمات (أو مجموعة من الجسيمات) معقداً جداً حتى لتستحيل معالجته في الواقع عندما يكون لدينا عدد ضخم من الجسيمات؛ لذلك لجأ لاغرانج لكي يحرر ميكانيك نيوتن من هذه الصعوبة إلى تطوير طرائق تسهل معادلات نيوتن بأن وجد معادلات أقل منها عدداً وتكفي لوصف المجموعة. وتقوم طريقته في ذلك على مفهومه عن درجات الحرية في منظومة الجسيمات الذي نستطيع فهمه جيداً إذا بدأنا بالنظر في حركة جسيم واحد. فإذا لم يكن هذا الجسيم خاضعاً لأية قوة على الإطلاق فإنه يكون حراً في أن يتحرك في أي اتجاه من ثلاثة اتجاهات متعامدة مثنى مثنى؛ وتمثل هذه الاتجاهات الثلاثة بثلاثة مستقيمات متعامدة مثنى وتتقاطع في نقطة واحدة. فإذا أخذنا جسيماً على سطح الأرض (سيارة مثلاً على طريق واسع كثير التلال) فإنه يتحرك شمالاً وجنوباً، شرقاً وغرباً، صعوداً ونزولاً؛ فنقول إن لهذا الجسيم ثلاث درجات من الحرية؛ ولكي نصف حركته حين تؤثر فيه قوة ما نحتاج إلى ثلاث معادلات نيوتنية في الحركة. فإذا كان لدينا مجموعة من الجسيمات فإن كلاً منها يحتاج إلى ثلاث معادلات كهذه؛ وهكذا يصبح عدد المعادلات الكلي كبيراً كبراً غير مقبول كلما ازداد عدد الجسيمات. لذلك بيّن لاغرانج كيف أنه بمراعاة القيود التي تخضع لها هذه الجسيمات في المجموعة والتي هي عادة من طبيعة هندسية يمكن اختزال هذا العدد إلى مجموعة من المعادلات التي يمكن معالجتها رياضياً، إذ تتيح هذه القيود للمرء أن يضع بمساعدة لاغرانجي المجموعة عدداً قليلاً من المعادلات بدلاً من العدد الضخم من معادلات نيوتن في الحركة؛ وتصبح المعادلات أيضاً أكثر بساطة إذا وضع مكان إحداثيات الجسيمات العادية ما يسمى «الإحداثيات المعممة» (وهي بعض التراكيب الجبرية الهندسية المركبة من الإحداثيات القديمة)، وكذلك «متجهات السرع المعممة» التي هي معدلات تغير الإحداثيات المعممة في الزمن. ولعل القليل من الأمثلة يوضح هذا التبسيط المهم لمعادلات نيوتن.

لنبدأ أولاً بمثال النواس البسيط الذي يتألف من كرية كتلتها m معلقة في طرف خيط عديم الوزن وغير قابل للامتطاط طوله L، فالخيط يقيد حركة الكرية بأن تظل على قوس من دائرة نصف قطرها هو طول الخيط، وهكذا يخفض الخيط درجات حريتها الثلاث إلى درجة واحدة هي التي نستطيع أن نعينها بالزاوية التي يصنعها الخيط مع الشاقول عندما تكون الكرية في أي نقطة من مسارها الدائري (ونشير إلى هذه الزاوية بالحرف اليوناني θ)؛ فهذه الزاوية هي إحداثي معمم للكرية، ومعدل تغيرها الزمني هو سرعتها المعممة $\dot{\theta}$ (والنقطة فوق الحرف θ تعني سرعة تغير الزاوية). فلاغرانجي النواس إذاً هو طاقة الكرة الحركية ($\frac{1}{2} ml^2\dot{\theta}^2$) مطروحاً منها الطاقة الكامنة [$mgL (1-\cos \theta)$] بفرض g تسارع الثقالة، أما $L (1-\cos \theta)$ فهو ارتفاع الكرية فوق وضع سكونها فيستطيع المرء الآن بإجراء بعض العمليات الرياضية على هذا التعبير أن يحصل منه على

معادلة لاغرانج للزاوية θ ؛ فتكون هذه المعادلة بديلاً عن معادلات نيوتن الثلاث في الحركة بإحداثيات الكرية المكانية . ومن هذه المعادلة الوحيدة في θ يمكن استنتاج جميع خواص النواس المهتز الديناميكية .

لنأخذ ، في مثال آخر ، مجموعة مؤلفة من كرتين موصولتين بقضيب صلب مهمل الوزن ، ولنلاحظ أنه لو كانت الكرتان حرتين (أي لا قضيب يصلهما) ، لكان لكل منهما حين تتحرك وحدها ثلاث درجات حرية ، ولكان عدد درجات الحرية الكلي ست درجات . ولكن القضيب قيدٌ يخفض درجات الحرية إلى خمس ، وهي ثلاث درجات حرية لحركة مركز كتل المجموعة الانسحابية (وهذا المركز هو نقطة على القضيب بعداها عن الكرتين يتناسبان عكساً مع كتلتيهما) إضافة إلى درجتي حرية دوران المجموعة لأنها تستطيع الدوران حول أي محور من محورين متعامدين وعموديين على القضيب في مركز كتل المجموعة .

لقد لجأ الفيزيائيون إلى هذه المفاهيم ، أي لاغرانجي الإحداثيات المعممة والسرع المعممة وتوسيع هاملتون لمبدأ الفعل الأصغري (بإنشاء الفعل من اللاغرانجي كما وصفه هاملتون) لأنها مكنتهم من معالجة حقول القوة معالجة ديناميكية مثل حقل الثقالة والحقل الكهرطيسي ؛ فيمكن الاستعانة إذاً نتيجة لذلك بإحداثيات الحقل المعممة وسرعه المعممة لتعيين لاغرانجي الحقل الذي يمكن أن ينشأ به فعل الحقل ؛ وعندئذ يؤدي مبدأ هاملتون في الفعل الأصغري إلى معادلات الحركة في الحقل .

قد يبدو ذلك كله تجريدياً جداً إذا لم يكن ثمة كمية « واقعية » مقيسة وواضحة مثل المكان والزمان والقوة والكتلة ، أي الكميات التي بُنيت عليها فيزياء غاليليه ــ نيوتن ؛ ولكن مفاهيم الفعل واللاغرانجي ومبدأ الفعل الأصغري في الفيزياء النظرية هي اليوم ذات أهمية فائقة لا تضاهى . ولقد بلغت هذه التطورات ذروتها في معادلة هاملتون ــ جاكوبي الشهيرة في فعل منظومة ما وهي التي اكتشفها هاملتون والألماني كارل . ج . جاكوبي Karl.G.Jacobi ، أحد رياضيي القرن التاسع عشر البارزين ، إذ يمكن أن يستنتج المرء من الفعل الذي يحصل عليه من حل هذه المعادلة جميع خواص المنظومة الديناميكية الملحوظة مثل الاندفاع والطاقة وعزم الاندفاع ، حتى أنها تمثل من وجهة نظر ما ، أرقى تركيب عرفه ميكانيك نيوتن ، لا بل إنها ذهبت إلى أبعد من ذلك ، فطبّقت في الإلكترودیناميك التقليدي (أي التأثيرات المتبادلة بين الشحنات الكهربائية والحقول الكهرطيسية) ، وفي الديناميك النسبوي . وهي ، على الرغم من أنها طورت الميكانيك النيوتني ، فإنها ارتبطت ارتباطاً وثيقاً بمعادلة شرودنغر الموجية للجسيم في ميكانيك الكم ، إذ يمكن تعيين معادلة شرودنغر لجسيم مفرد من قيم الفعل التقليدي المتعددة التي يمكن تحديدها .

ويمكن أخيراً الحصول بسهولة على مدار كوكب ما حول الشمس باستخدام مبادئ

الانحفاظ بدلاً من حل معادلات نيوتن في الحركة. وسنقتصر هنا على تلخيص الطريقة بدون أن ندخل في التفاصيل الجبرية. فلنأخذ كوكباً كتلته m (وليكن الأرض مثلاً) والشمس، ولتكن كتلتها M؛ فالكتلتان تتجاذبان ثقالياً، أي تجذب كل منهما الأخرى وفق الخط الوهمي الواصل بينهما. ولما كانت الأرض والشمس كرويتين وكانت حركة الكرات في حقل الثقالة كما لو أن كتلها مجمعة في مراكزها، فإنه يمكن أن نستبدل بالأرض والشمس كتلتين نقطيتين (أي كتلتين مركزيتين في نقطتين) تفصل بينهما مسافة تساوي المسافة بين مركز الشمس ومركز الأرض. وينتج من قانون نيوتن الثالث أن الأرض تجذب الشمس بقوة تساوي تماماً قوة جذب الشمس للأرض غير أن استجابة الشمس لهذه القوة أصغر من استجابة الأرض بنسبة تساوي نسبة كتلة الأرض إلى كتلة الشمس؛ أو باختصار، إن استجابة الأرض أكبر كثيراً من استجابة الشمس لأن كتلة الأرض أصغر كثيراً من كتلة الشمس. فإذا أبقينا هذه الحقيقة في أذهاننا استطعنا أن نرى كيف تعين العناصر الهندسية والحركية والديناميكية التي لها صلة بالأمر مداري هذين الجسيمين.

دعونا نفترض في البدء أن الجسيم m (الأرض) والجسيم M (الشمس) كانا متوقفين (لوجود قوة ما تمنعهما من الحركة) وأن المسافة بينهما r؛ ولنطبق مبادئ الانحفاظ لكي نرى كيف يتحركان بعد زوال القوة التي كانت تبقيهما ساكنين في مكانيهما. فقبل حدوث ذلك كان الاندفاع الكلي للمجموعة (أي لجسيمين: الشمس والأرض) مساوياً الصفر، وكذلك كان اندفاعهما الزاوي الكلي مساوياً الصفر (إذ لا دوران)، وطاقة المجموعة الحركية كانت أيضاً صفراً؛ أما طاقتها الكلية فهي الطاقة الكامنة المتبادلة للجسيمين وهي سالبة. إن مبادئ الانحفاظ تنبئنا الآن على نحو صحيح كيف يجب أن يتحرك الجسيمان كي يظلا خاضعين لهذه المبادئ: لما كان الاندفاع الكلي للمجموعة يجب أن يبقى صفراً فلا يمكن لأيٍ من الجسيمين إلا أن يتحرك في اتجاه الآخر وفق الخط الواصل بينهما بحيث يظل مجموع اندفاعيهما مساوياً الصفر. وهذا يعني أن الكتلة m (الأرض) تتحرك على هذا الخط بسرعة أكبر من سرعة الكتلة M (الشمس) بالنسبة $\frac{M}{m}$. أو بمعنى آخر: إن جداء m في سرعتها يساوي جداء M في سرعتها. فلو أن هذا كان ما يحدث فعلاً للأرض والشمس لكانت سرعة الأرض تساوي دائماً 340000 مرة سرعة الشمس.

ولما كانت سرعتا m وM تزدادان مع تحرك الواحدة منهما باتجاه الأخرى فطاقتاهما الحركيتان تزدادان ولكن ازديادهما يكافئه تماماً نقصان في طاقتيهما الكامنتين، إذ يجب أن تبقى الطاقة الكلية للجملة ثابتة، بحسب مبدأ انحفاظ الطاقة. كما لا يمكن أن تظلا ملتصقتين في مركز مجموعة الكتلتين بعد اصطدامهما، وإلا لما ظلت طاقتهما الكلية منحفظة، فلا بد إذاً أن تنفصلا وتبتعد كل منهما عن مركز مجموعة الكتلتين بسرعة الانفصال نفسها في كل نقطة وبالسرعة نفسها التي وصلت بها إلى هذه النقطة، ثم يتوقف الجسيمان (آنياً) عندما تصبح المسافة بينهما مساوية تماماً تلك التي

كانت تفصل بينهما في البدء، وعندئذ تتحركان من جديد كلٌ منهما باتجاه الأخرى وتعيدان الدورة، ويبقى الجسيمان في اهتزازهما على طول الخط الواصل بينهما أبد الدهر طالما لم يفقدا في أية دورة شيئاً من طاقتهما الميكانيكية.

ولا شك في أن مدار هذه المجموعة مدار خاص جداً لا يصح لأي كوكب؛ أما إذا أردنا الحصول على مدار كوكبي فعلاً فعلينا أن نؤثر في المجموعة بعزم دوران كي نعطيها اندفاعاً زاوياً؛ وهذا ما يمكن تحقيقه بسهولة بأن نؤثر لمدة قصيرة جداً بقوة في الكتلة m وفي اتجاهٍ متعامدٍ تماماً مع الخط الواصل بين m وM، فيكون مقدار عزم الدوران هذا مساوياً جداء هذه القوة الجانبية في بعد m عن مركز كتلة المجموعة، ويكون الاندفاع الزاوي الذي اكتسبته المجموعة مساوياً جداء عزم الدوران في مدة تأثير القوة في الكتلة m.

ولكي نحصل على مدار m حول مركز كتلة المجموعة، نلاحظ أنه عندما تُدفع m جانبياً لمدة قصيرة بزاوية قائمة مع الخط الواصل بين الكتلتين، فإنها تكتسب بعد دفعها سرعة جانبية تجعلها ترسم قوساً يتعين شكلها بحسب السرعة الجانبية التي اكتسبتها بعد دفعها ويمكن أن يكتب المرء طاقتها الكلية (الحركية مع الكامنة)، التي لا يمكن أن تتغير، في كل مرحلة من حركة m، وكذلك اندفاعها الزاوي الذي يبقى ثابتاً هو أيضاً طيلة حركة m في مسارها، فيحصل بذلك من هاتين الخاصتين الديناميكيتين الثابتتين على معادلتين جبريتين تتعلقان بسرعة m وبعدها عن مركز المجموعة في كل نقطة من مسارها. ويرينا حل هاتين المعادلتين أن مدار m قطعٌ ناقص، وأن الخط الواصل من m إلى مركز المجموعة يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية. وهاتان الخاصتان لحركة m هما بالتحديد القانون الأول والقانون الثاني من قوانين كبلر؛ أما القانون الثالث فينتج أيضاً مباشرة من هاتين المعادلتين (ونلاحظ أيضاً أن شكل مسار M حول مركز المجموعة شبيه بشكل مسار m نفسه، ولكن أصغر منه بنسبة الكتلتين أي بالنسبة $\frac{m}{M}$).

لقد بسطنا هذه الأفكار وذهبنا فيها إلى مدى يظهر كيف تطبق قوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة على تلك الحالةِ المهمةِ، حالةِ جسمين يؤثر أحدهما في الآخر، لأن هذه الحالة تمثل الجزء الأهم من ميكانيك نيوتن، فضلاً عن أنها أبسط مجموعات الجسيمات الثقالية، (جسيمان كتليان)، كما يمكن الحصول بدقة على حركاتها (أو مداراتها). أما مدارات ثلاثة جسيمات أو أكثر يؤثر بعضها في بعض، (أي مسألة n جسيماً الشهيرة مع n أكبر من 2) فلا يمكن أن تكتب في صورة رياضية واضحة إلا في أحوال خاصة جداً مثل الأجسام الثلاثة التي حلها لاغرانج في حالة محدودة. ولكن لا يمكن حل مسألة الأجسام الثقالية المتعددة بطريقة حسابية إلا باتباع طريقة الاضطرابات التي تستخدم التقريبات العددية المتوالية للوصول إلى أفضل تقريب مرغوب فيه يعطي الحل الصحيح (أي المدارات المشاهدة).

نشوء البصريات والكهرباء والمغنطيسية

«العلة خفية، ولكن أثرها معروف».
ــ أوفيد*

نهاية العصر النيوتني

استمرت سيطرة الميكانيك والثقالة النيوتنيين على الفيزياء حتى منتصف القرن التاسع عشر حين بلغت هذه السيطرة ذروتها في أعمال الفيزيائيين الرياضيين في عصر ما بعد نيوتن. فقد كان الميكانيك النيوتني يتطور إلى بنية رياضية بديعة جداً ترضي الفكر بجمالها، مما جعله منافساً قوياً لفروع الفيزياء الأخرى مثل البصريات والكهرباء والمغنطيسية والحرارة (الترموديناميك) التي كانت تنمو وتتطور بمعزل عنه، وببطء يعزى سببه جزئياً إلى تقدم الميكانيك عليها. أضف إلى ذلك أن نجاح تطبيقاته على الكواكب ونتائجها المباشرة السهلة الإدراك، كان أكثر إغراءً من الغموض النسبي للبحث في مختبر مخفي منعزل في قضايا صعبة مبهمة تتعلق بطبيعة المادة.

وقد جاء الدليل على نجاح ميكانيك نيوتن نجاحاً مثيراً وكاملاً من الحسابات المستقلة التي أجراها كلّ من ج. ك. أدامز J.C.Adams في بريطانيا، وأ. ج. ج. لوفيرييه U.J.J.Leverier في فرنسا في عام 1846. فقد بيَّن هذان العالمان أن انحراف مدار الكوكب أورانوس عن مداره المحسوب، يمكن أن يكون ناشئاً عن كوكب غير مرئي يدور حول الشمس في مدار أبعد من مدار أورانوس، ودعي هذا الكوكب فيما بعد بلوتو عندما رصد منحرفاً بحدود درجة زاوية واحدة عما تنبأ به العالمان. وقد أحدث هذا الكشف حماساً هائلاً رفع من سوية العلم في التفكير الجماهيري إلى سوية

* OVID (43 ق.م ــ 18 م) شاعر لاتيني بدأ حياته بدراسة القانون ولكن سرعان ما اتجه إلى الأدب وأصبح من الأدباء البارزين. وطابع أشعاره الاستخفاف وهي تخلو من روح الجد مما جعله شاعراً طريفاً يحب الناس تلاوة شعره.

الدين إن لم يكن إلى أكثر من ذلك ، إذ أمكن بالفكر المحض (الرياضيات) أن يُستنتج من نظرية علمية مجردة وجود كوكب لم يسبق لأحد قط أن فكر فيه من قبل . كما تبين أن الجمع بين العلم والرياضيات يصبح في الأيدي الخبيرة أداة فكرية قادرة جداً .

وكان اختيار العمل في الميكانيك النيوتني بدلاً من العمل في فروع الفيزياء الأخرى في عصر ما بعد نيوتن ناشئاً أيضاً عن سهولة استخدامه ، إذ إن النظرية الفيزيائية والرياضيات والمسائل التي تطبق عليها هذه الآلة النظرية كانت كلها في متناول الباحث ، ومضت هذه المسائل إلى أبعد من مجرد مسائل نظرية بحتة تتناول جسيمات مثالية تتحرك في ظروف مثالية ، إذ عالجت بنجاح مسائل من قبيل المد والجزر وجريان الأنهار ومسارات القذائف (علم القذائف) وحركات العجلات والأقسام الآلية وشروط استقرار البنى ، فأقيمت بذلك الهندسة الميكانيكية والمدنية على أساس علمي راسخ متين .

لقد يسرت النظرية النيوتنية القيام بمثل هذه الأعمال العلمية ، غير أن اكتشاف طبيعة الضوء وسبر بنية المادة لم يتما بيسر مقارنة بها ، فكانت الاكتشافات في هذه الميادين بطيئة وعرضية في كثير من الأحيان . ذلك لأن هذه الفروع لم يكن لها مثل الميكانيك النيوتني أساس رياضي تتطور منه ، وكان الكثير منها يتم بطريقة التجربة والخطأ وبتجارب مخبرية بدائية جداً . ومع ذلك فقد قاس العالم الهاوي الثري هنري كافنديش H.Cavendish في عام 1794 قوة التجاذب الثقالي بين كرتين من الرصاص عرفت كتلتاهما والمسافة الفاصلة بين مركزيهما ، وحصل بذلك على أول قيمة عددية لثابت الثقالة النيوتنية بدقة جيدة .

البصريات ما بعد نيوتن

لقد تم اكتشاف حقائق عديدة عن انتشار الضوء وطبيعته وأثبتت قياسات فيزو Fizeau وفوكو Foucault في خمسينيات القرن الماضي أن سرعة الضوء في وسط كثيف أصغر من سرعته في وسط مخلخل (في الماء مثلاً مقابل الهواء أو الخلاء) ، فنُبذت نظرية نيوتن الجسيمية لصالح نظرية هويغنز الموجية . ثم دعمت هذا الاختبار بشدة تجارب ت . يُنغ T.Young وأ . ج . فرينل A.J.Fresnel اللذين فسرا باستخدام النظرية الموجية ظواهر استقطاب الضوء وتداخله وانعراجه (أي انحرافه عند الحواف) ، وهي ظواهر لم تكن مفهومة قط من وجهة النظر النيوتنية التي عجزت عن تفسيرها . ولكن ، على الرغم من التسليم الكامل بالنظرية الموجية في ذلك الحين ، فإنه لم يكن يُعرف أي شيء عن طبيعة هذه الموجة الفيزيائية أو عن كيفية انتقالها مسافات شاسعة كالتي تفصل النجوم عن الأرض . لأن من المعروف آنذاك أنه لا بد من وجود وسط تنتقل فيه الأمواج (فالأمواج الصوتية مثلاً تنتقل في الهواء ، وتموجات الماء تنتقل على سطحه) ، في حين لم يكن يوجد وسط

واضح ينقل الأمواج الضوئية، لذلك اخترع وسط كهذا سمي «الأثير النووي».

ولم تعرف طبيعة الموجة الضوئية إلا بعد أن درس ج. ك. مكسويل J.K.Maxwell اكتشافات م. فرادي M.Faraday التجريبية في الكهرباء والمغنطيسية، وكتب بعدها في عام 1862 معادلاته الشهيرة في الحقل الكهرطيسي التي بينت أن الضوء ظاهرة كهرطيسية. ولكن الجهل بطبيعة الأمواج الضوئية في النصف الأول من القرن الماضي لم يمنع من أن تعرف بعض خواص الضوء الهامة وأن يستفاد منها في الأغراض العملية. فالصيغة الموجية الأساسية مثلاً ــ أي جداء طول الموجة في تواترها يساوي سرعة انتشارها ــ كان معروفاً كل المعرفة. والمقصود بطول الموجة هو المسافة الفاصلة بين ذروتين متتاليتين فيها، وأما التواتر فهو عدد الذروات التي تمر بنقطة معينة أثناء ثانية واحدة. وتسمى وحدة التواتر (وهي هزة واحدة في الثانية) هرتز نسبة إلى العالم التجريبي الألماني العظيم هـ. ر. هرتز H.R.Hertz الذي تحقق تجريبياً من نظرية مكسويل الكهرطيسية في الضوء، وقد أثبت أيضاً في ذلك الحين أن طول موجة الضوء الأحمر تساوي ضعفي طول موجة الضوء البنفسجي، وأن الأمواج الضوئية بمختلف أطوالها (بمختلف ألوانها) تنتقل في الخلاء بسرعة واحدة.

ولقد أدى أخيراً اكتشاف نيوتن للطيف الضوئي (أي اكتشاف أن الضوء الأبيض خليط من جميع الألوان المرئية) إلى اكتشاف المطياف الذي قد يكون، على بساطته، أهم أداة ابتكرت على الاطلاق، لأن اختراعه أدى إلى اكتشافات علمية تتدرج من المجال النووي في الفيزياء إلى المجال الكوني (الكوسمولوجي) في الفلك، وتتضمن كل فروع الجيولوجية والكيمياء والطب، وهي أعظم من الاكتشافات التي تمت بأي أداة أخرى أو أي تركيب من عدة أدوات.

وقد كان تصميم عدسات من جميع الأنواع أهم تطبيق عملي للنظريات البصرياتية، ولم تكن تلزم لهذا الغرض معرفة بالضوء الموجي أو الفيزيائي، لأن البصريات الهندسية وأشعتها التي أهملت الجانب الموجي في الضوء، هي كل ما كان ضرورياً لتصميم أعقد الأجهزة البصرية. وهكذا صممت وصنعت كل أنواع المقاريب والمجاهر وعدسات التصوير بالاعتماد على قانون سنل Snell فحسب، وهو ينص على كيفية انعطاف الضوء كلما مر الشعاع من وسط إلى آخر. فالاختلاف بين وسطين يتوقف، فيما يتصل بالشعاع الضوئي، على سرعته في الوسط ويعبّر عن هذه السرعة بعدد يدعى «قرينة انكسار الوسط» Index of refraction وكلما كبر هذا العدد في حالة وسط ما صغرت سرعة الضوء فيه وازداد انعطاف الشعاع أو انكساره فيه إذا اختلفت الزاوية التي يصنعها الشعاع الوارد مع سطحه عن 90° درجة. وهكذا عرفت البصريات التطبيقية القائمة على الهندسة لا غير تطوراً كبيراً ومزدهراً في أثناء هذه الفترة، ولكن تصميم الأجهزة البصرية تهتم اليوم أكثر من قبل بخواص الضوء الموجية لأن مراعاة هذه الخواص أساسية قطعاً إذا أريد أن تكون دقة التصميم عالية.

الكهرباء والمغنطيسية

لقد عرف اليونانيون الأوائل حقاً ظواهر الكهرباء والمغنطيسية (الحجر المغناطيسي)، كما كان فيزيائي بلاط الملكة إليزابيت، و. جلبرت William Gilbert، يقوم بتجارب واسعة بوساطة المغنطيسات، إلا أن الفورة العارمة في تطور الكهرباء والمغنطيسية ونظرياتهما لم تحدث إلا بعد اكتشاف التيارات الكهربائية وما تلاها من اكتشاف الخواص المغنطيسية لهذه التيارات. وكانت الكهرباء (الكهرباء الراكدة) والمغنطيسية (المغنطيسية الراكدة) حتى ذلك الوقت، ينظر إليهما في الغالب على أنهما تفيدان في تكريم الناس وتسليتهم في الحفلات لا على أنهما ظاهرتان طبيعيتان جديرتان بالدراسة.

وفي الفترة بين أواخر القرن السابع عشر وأوائل القرن الثامن عشر درست قلة من العلماء الهواة المتحمسين الكهرباء الراكدة دراسة جدية، ولكن دون أن تتطور بعد ذلك مجموعة من النظريات مماثلة لتلك التي أعقبت أعمال نيوتن. فقد ابتكرت آلات كهراكدية (لتركيز كميات ضخمة من الشحنات الكهربائية على مجموعة من الكرات)، كما صنعت بعض الأدوات مثل وعاء ليدن Leyden (وهي أساساً مكثفة كهربائية) لتخزين الشحنة الكهربائية، إلا أنه لم تتخذ الخطوة اللازمة للانتقال من هذه الأجهزة إلى مفهوم الموصلات (النواقل) الكهربائية وفكرة الدارات الكهربائية. وكان بنيامين فرانكلين B.Franklin أقرب العلماء إلى اتخاذ هذه الخطوة في بحثه عن تفريغ البرق، إذ بين أن هذا التفريغ يحدث شرارات كهربائية عند أطراف الأسلاك القريبة من الأرض، إذا كانت أطرافها الأخرى مرتفعة ارتفاعاً كافياً فوق الأرض ليجد التفريغ سبيله إليها. ثم طرح فرانكلين في عام 1752، بالاعتماد على هذه المشاهدات، فكرة مائع كهربائي عديم الوزن موجود في داخل كل مادة ويتخلل الفضاء كله. فإذا زادت كمية هذا المائع داخل الجسم عما في خارجه، انطلقت عندئذ دفقة نحو الخارج وأصبح الجسم ذا شحنة سالبة، أما إذا حدثت الدفقة في الاتجاه المعاكس (نحو الداخل) فإن الجسيم يصبح ذا شحنة موجبة، وهكذا اقترنت الشحنة بهذه الإشارة أو تلك بحسب ما يكون هناك فائض من المائع الكهربائي الكوني أو نقص فيه.

وقديماً كان اليونانيون الأوائل قد درسوا الظواهر الكهربائية والمغنطيسية، إلا أن تقدم علم الكهرباء الراكدة والمغنطيسية الراكدة ظل بطيئاً لأنه لم يكن قد اكتشف بعد قانون كمي يعبر عن القوة الكهربائية بين شحنتين. وكان يعرف ابتداءً من تجارب دوفيه Dufay في فرنسا عام 1730 أن الجسيمين المشحونين كهربائياً يجذب أحدهما الآخر (إذا كانت شحنتاهما متعاكستين)، وأنهما يتنافران (إذا كانتا متماثلتين)، ولكن هذه المعرفة كانت كيفية محضة. وقد أصبحت بعدئذ كمية عندما قاس ش. أ. دي. كولون Charles Augustin de Coulomb التنافر بين كرتين صغيرتين تحملان كميتين متساويتين من الشحنات الموجبة، وتفصل بينهما مسافة قاسها بكل عناية. وقد

استخدم لذلك ميزان فتل حساس واكتشف أن قوة التنافر تتغير ــ مثلما تتغير قوة التجاذب في قانون نيوتن ــ عكساً مع مربع المسافة بين مركزي الكرتين وطرداً مع جداء الشحنتين . لذلك يعرف قانون كولون هذا بقانون التربيع العكسي للقوة الكهربائية ، وهو يطبق أيضاً على شحنتين مغنطيسيتين أو قطبين مغنطيسيين يجذب أحدهما الآخر (إذا كانا مختلفين) ويُنفِّر أحدهما الآخر (إذا كانا متماثلين) . ولما كان هذا القانون يطبق على الأجسام المشحونة كهربائياً سواء أكانت تحمل شحنات متساوية أم غير متساوية ، فإن قانون كولون ينص جبرياً على ما يلي : $F = q_1q_2/r^2$ ، (q_1 و q_2 : كميتا الشحنتين على الكرتين و r : المسافة الفاصلة بين مركزيهما) . فمن هذا القانون ، يمكن تعريف وحدة الشحنة الكهربائية (وتسمى وحدة كهراكدة ، أو e.s.u مختصر electrostatic unit) . وتعرف على أنها كمية شحنة متوضعة على كرة تتنافر مع كرة أخرى تحمل شحنة مساوية لها بقوة 1 دينة ، حين تفصل بين مركزيهما مسافة 1 سم . ولا يصح هذا القول إلا إذا كانت الشحنة الكهربائية على كل من الكرتين موزعة توزعاً متساوياً على سطح الكرة لكي يصح النظر إليها كأنها مجمعة كلها في مركز الكرة ، فإذا كانت الكرتان من معدنين موصلين للكهرباء ، صح ذلك تلقائياً ، لأن الشحنات تكون حرة الحركة عندئذ فتتنافر لتكوِّن في النهاية طبقة سطحية منتظمة الشكل . ويعد قانون كولون الذي يعطي القوة بين شحنتين كهربائيتين أو بين قطبين مغنطيسيين ، أساس الكهربائية الراكدة والمغنطيسية الراكدة . ولئن كانت الشحنتان الكهربائيتان الموجبة والسالبة يمكن أن توجد إحداهما بمعزل عن الأخرى ، إلا أن الأقطاب المغنطيسية لا يمكن أن توجد فرادى . وهذا الفارق يؤدي إلى اختلاف هام بين الكهرباء والمغنطيسية على الرغم من ارتباط الظاهرتين ارتباطاً وثيقاً كما سنرى .

ولم يفكر أحد طيلة هذه الفترة بأنه يمكن توليد تيار كهربائي ، أي جعل شحنة كهربائية تتدفق باستمرار ويمكن مراقبتها في أي وقت ، على الرغم من أنه سبق أن شوهدت ظواهر كهربائية عديدة كانت تستدعي مثل هذا التدفق (أي تيار كهربائي) . وقد أتى أول اكتشاف لهذا التيار مصادفة في عام 1780 حين لاحظ أستاذ التشريح في بولونيا (إيطاليا) ل. غالفاني L.Galvani أن عضلات ساق الضفدع كانت تتقلص تقلصات تشنجية عند ملامستها لمعدنين مختلفين (توتياء ونحاس) ، وقد وصف هذه التقلصات بأنها ظاهرة حيوية (بيولوجيا) ، ولكن زميله أ. فولطا A.Volta أستاذ الفيزياء ، لم يوافقه على ذلك ، واقترح فكرة أن التيار تولد من المعدنين المختلفين عندما لامسا نهايتي العصب في ساق الضفدع ، وأن العصب لم يولد التيار كما فكر غالفاني ، بل كان مجرد موصل للتيار ، وعندئذ بين فولطا أنه إذا وصلت النهايتان الجافتان من قضيبي نحاس وتوتياء مغموسين في حمض الكبريت بسلك معدني فإن تياراً قوياً يجري في السلك . فكان هذا الابتكار أول وعاء فولطائي وبداية التقانة الكهربائية . كما بين فولطا أن شدة التيار الكهربائي المتولد بهذه الطريقة يتوقف على نوع معدني القضيبين وعلى نوع الحمض المستعمل . ثم سرعان ما تم الانتقال في البحث

الكهربائي بعد هذا الاكتشاف من الكهرباء الراكدة إلى دراسة التيار الكهربائي . ولم يعد ثمة مناص بعد ذلك من اكتشاف الكهرطيسية كما حدث فعلاً بعد عدة سنوات على يد هـ . كريستيان أورستد Hans Christian Oersted في عام 1820 .

ولد أورستد (1777-1851) في لانج لوند في الدانمارك . وكان ابناً لصيدلاني لا يملك إلا القليل من المال لإعالة أفراد العائلة الكثر ، فأرسل كريستيان وأخاه الأصغر أندرس Anders ، وكانا لا يزالان ولدين صغيرين جداً ، ليقيما عند صديقي العائلة ، وهما صانع شعر مستعار وزوجته . فاعتنى الزوجان بتربية الصبيين وعلماهما بعضاً من اللاتينية والرياضيات ، كما علماهما الألمانية مع التوراة العائلية (نسخة كبيرة من الكتاب المقدس تحتوي على صفحات خاصة كبيرة لتسجيل أحداث الولادة والزواج والوفاة) . وكان الولدان يتعلمان بسرعة وأظهرا ، على الرغم من تعليمهما المنهجي الضئيل ، درجة من حب المعرفة قل أن يتمتع بمثلها أطفال في هذه السن الغضة . ولم تأت تنشئة كريستيان العلمية في هذه الفترة من حياته من دروس المدرسة الابتدائية ، بل من مساعدة والده في الصيدلية حين كان يعيش بعيداً عن ذويه .

وقد نجح كريستيان في فحص القبول للدراسة في جامعة كوبنهاغن على الرغم من نشأته الدراسية المحدودة ، وبدأ يدرس فيها في عام 1794 . ومع أنه اهتم اهتماماً كثيراً بالفلسفة ولا سيما بأعمال عمانويل كنط ، فإن هذا لم يمنعه من دراسة الفلك والفيزياء والرياضيات والكيمياء والصيدلة ، وقد حاز في عام 1797 على شهادة في الصيدلة . وبعد أن عمل محرراً في صحيفة فلسفية مدة قصيرة بدأ يعد رسالته للدكتوراه التي درس فيها أهمية فلسفة كنط في العلوم . وفي عام 1801 قام بسلسلة من الرحلات في أنحاء ألمانيا لدراسة العمل الذي كان يُجرى لبيان العلاقة بين الكهرباء والكيمياء والذي هيأ السبيل لاختراع النابعة (البطارية) الفولطائية .

ثم عاد أورستد إلى كوبنهاغن عام 1804 وحاول الحصول على وظيفة لتعليم الفيزياء ، ولكن دون جدوى . فاضطرته حاجته إلى المال إلى البدء بإعطاء سلسلة من المحاضرات العامة عن مواضيع علمية وفلسفية ، وقد لقيت هذه المحاضرات استقبالاً جيداً لدرجة أن أمين جامعة كوبنهاغن قام بإجراءات أدت إلى إحداث وظيفة تعليمية خاصة لأورستد الذي بدأ بعد أن استقر في وظيفته الجامعية ، بكتابة نشرات علمية ساعدت على توطيد شهرته التعليمية .

ويبدو من الروايات التي ذاعت عن اكتشاف أورستد ، والتي رواها أولئك الذين شهدوا محاضراته لشرح التجربة في أثناء إجرائها، أن أورستد كان حائراً تجاه ما حدث كأنه لم يكن يتوقعه . فقد مرر تياراً شديداً في سلك كان يصل نهايتي المسريين الموجب والسالب لنابعة فولطائية ، ففوجيء برؤية إبرة البوصلة ، التي كانت في البدء موازية للسلك في اتجاه الشمال ـــ الجنوب ، تدور 90° درجة ، وتبقى ثابتة في اتجاه الشرق ـــ الغرب متعامدة مع السلك ، وعندما عكس اتجاه التيار في

السلك دارت الإبرة فوراً 180° درجة. فكانت الإبرة تتخذ دائماً وضعاً عمودياً على السلك بغض النظر عن اتجاهه، مع بقاء قطبها الشمالي في أحد جانبي السلك أو في الجانب الآخر بحسب اتجاه تدفق التيار في السلك. وقد كان هذا الاكتشاف حتماً أحد أعظم الاكتشافات العلمية في كل العصور، لأنه مهد الطرق المؤدية إلى مجالات الكهرطيسية الواسعة، العلمية والتقنية، التي أحدثت تغيراً كبيراً في كل أوجه الحياة والمجتمع. وكان لهذا الاكتشاف نفسه أثر مباشر في البحث العلمي، لأنه أشار إلى وجود قوة تؤثر في الإبرة المغنطيسية تختلف كل الاختلاف في سلوكها عن القوة الكهراكدة أو المغنطيسية الراكدة أو القوة الثقالية، لأن دوران الإبرة دل فعلاً على أنها كانت تحت تأثير عزم دوران نشأ عن التيار الكهربائي لا عن قوة جذب أو قوة تنفير، كما هو الأمر في حالة كتلتين أو شحنتين كهربائيتين أو قطبين مغنطيسيين يؤثر أحدهما في الآخر. أما أن الدوران كان مفعولاً مغنطيسياً فهذا ما كان واضحاً من أن إبرة البوصلة لا تتأثر بالشحنات الكهربائية. وهكذا استنتج أورستد بحق أن التيار الكهربائي يولد مغنطيسية، وهذه ظاهرة لا بد لشرحها شرحاً وافياً من إدخال مفهوم الحقلين الكهربائي والمغنطيسي.

الحقلان الكهربائي والمغنطيسي

رأينا أن باستطاعتنا أن نستبدل بمفهوم التأثير الثقالي عن بعد التأثير الذي تتبادله كتلة مع حقل ثقالي تولده في جوارها كتلة أخرى، وبذلك تصبح القوة بين جسيمين منفصلين هي التأثير الذي يتبادله كل جسم مع كيان (هو الحقل) في الفضاء الذي يشغله هذا الجسم، إذ إن الحقل نفسه هو كل شيء فيزيائي كامل الانتشار all-pervasive، أو هو بنية تتجدد في كل نقطة من الفضاء بشدتها (أو بمقدارها) واتجاهها. فالحقل الثقالي في نقطة من الفضاء لمجموعة كتل موزعة بطريقة ما يساوي عددياً تسارع وحدة الكتل في هذه النقطة، وتسعى الكتل كلها في الحقل الثقالي إلى الانتقال من الجانب الأضعف فيه إلى الجانب الأقوى. وهذه هي الطريقة نفسها التي تتبعها في حالة القوى الكهراكدية والمغنطيسية الراكدة بين الشحنات الكهربائية أو بين الأقطاب المغنطيسية، مع العلم أن هذين الحقلين أعقد قليلاً من الحقل الثقالي، لأن الشحنات الكهربائية تتجاذب وتتنافر، وكذلك تفعل الأقطاب المغنطيسية ولكن فكرة الحقل العامة هي نفسها.

إن شدة الحقل الكهربائي الذي تحدثه نقطة شحنتها q، في نقطة تبعد عنها مسافة r، تساوي حاصل قسمة هذه الشحنة على مربع المسافة، أي تساوي q/r^2. واتجاه الحقل هو الاتجاه الذي تتحرك فيه شحنة موجبة إذا وضعت في هذه النقطة، أو بعبارة أخرى، إن الحقل الكهربائي في نقطة معينة هو القوة التي تؤثر في وحدة الشحنات الموجبة إذا وضعت في هذه النقطة. لذلك يمكن أن يكون الحقل موجباً أو سالباً حسبما تكون الشحنة التي تولده موجبة أو سالبة، إذ إن الشحنة

الموجبة والشحنة السالبة تتحركان باتجاهين متعاكسين إذا وضعتا في النقطة نفسها من حقل كهربائي. وتنطبق كل هذه الملاحظات على الحقول المغنطيسية الناشئة عن أقطاب مغنطيسية.

ولا صعوبة تذكر في تعيين الحقل الكهربائي أو المغنطيسي حين تكون هناك شحنة كهربائية واحدة أو قطب واحد، إلا أن المسالة تصبح معقدة تعقيداً يزداد كلما ازداد عدد الشحنات أو الأقطاب، ولتسهيلها نستطيع أن نقوم بما قمنا به في الثقالة، فنعرف الحقل في كل نقطة بكمونه في هذه النقطة، علماً بأن مفهوم الكمون في نقطة من الحقل يصدر عن مفهوم الطاقة الكامنة. فكما يمكن أن يكون للجسيم في حقل ثقالي طاقة حركية وطاقة كامنة (سبق أن مثلناه بوضوح بكرة النواس المهتز) كذلك يمكن أن يكون للشحنة الكهربائية المتحركة طاقة حركية وطاقة كامنة في الحقل الكهربائي. ويعرف الكمون الكهربائي في نقطة ما من حقل كهربائي بأنه العمل اللازم لنقل وحدة الشحنات الكهربائية من اللانهاية إلى تلك النقطة. فإذا كانت هذه النقطة على مسافة r من الشحنة التي تولد الحقل، فإن كمونها في هذه النقطة يساوي حاصل قسمة q على r، أي q/r، فالكمون في اللانهاية يساوي الصفر، وهو موجب أو سالب في نقطة ما حسبما تكون الشحنة المولدة للحقل موجبة أو سالبة. أما الطاقة الكامنة لشحنة موجودة في نقطة في حقل كهربائي فتساوي جداء مقدار هذه الشحنة في كمون الحقل عند هذه النقطة، وتكون هذه الطاقة موجبة أو سالبة حسبما تكون الشحنة الموجودة في هذه النقطة موجبة أو سالبة (وحسبما يكون الكمون أيضاً موجباً أو سالباً).

ويمتاز استخدام الكمون بدلاً من استخدام الحقل، في أن الأخير كمية متجهية، في حين أن الكمون كمية سلمية. فإذا كان الحقل ناشئاً عن عدد من الشحنات الكهربائية المختلفة، عندئذ نحصل على الكمون في أي نقطة في الحقل الناشيء عنها كلها بجمع الكمونات الفردية (جبرياً)، ثم يمكن بعد ذلك الحصول على شدة الحقل الكهربائي في أي نقطة في الحقل بإجراء عملية رياضية بسيطة على الكمون في هذه النقطة. أما حركات الشحنات الكهربائية المتبادلة التأثير، فيمكن أن نصفها الآن بقولنا إنها تتحرك دائماً من النقاط العالية الكمون إلى النقاط المنخفضة الكمون في الحقل الكهرساكني. وهذا ما يفسر جريان الشحنة الكهربائية من قطب إلى آخر في الوعاء الفولطائي.

ولكن دعونا، قبل العودة إلى اكتشاف أورستد، نصف طريقة تخطيطية لتمثيل الحقول بخطوط القوة، فهي تفيد في دراسة الكهرطيسية أكثر مما تفيد في وصف الحقل الثقالي. فخطوط القوة الثقالية المتولدة من جسيم كتلي هي مستقيمات متباعدة بانتظام تصدر عن الكتلة في جميع الاتجاهات، وهذا ما ينطبق أيضاً على خطوط القوة الكهربائية الصادرة عن شحنة نقطية. ولكن الاختلاف بين خطوط القوة الثقالية وخطوط القوة الكهربائية يظهر عندما يكون هناك جسيمان

كتليان يتبادلان التأثير ثقالياً أو يكون هناك شحنتان كهربائيتان تتبادلان التأثير كهربائياً . فخطوط القوة الثقالية بين جسيمين هي دائماً نفسها ، في حين أن خطوط القوة الكهراكدية بين شحنتين تتعلق بما إذا كانت الشحنتان من إشارة واحدة أو من إشارتين مختلفتين . فإذا كانتا من إشارة واحدة ابتعدت خطوط قوة إحداهما عن الأخرى ، ولكن إذا كانتا مختلفتين في الإشارة ، فإن خطوط القوة الصادرة عن إحداهما تتقارب عندئذ من الشحنة الأخرى أو مختلف الكتل العديدة الموجودة في جوارها . ولما كانت الشحنة الكهربائية الكلية في الكون تساوي الصفر (لأنه يوجد فيه من الشحنات الموجبة بقدر السالبة) فلا وجود لخطوط قوة متناثرة Stray في الكون . ولا تختلف خطوط القوة المغنطيسية هندسياً عن خطوط القوة الكهربائية ، لذلك يمكن أن توصف بالطريقة نفسها .

وتعرف شدة حقل القوة (الكهربائية أو المغنطيسية أو الثقالية) في اتجاه معين في نقطة معينة بأنها عدد خطوط القوة ، المارة من مساحة مقدارها 1 سم^2 عمودية على هذا الاتجاه في تلك النقطة . ومن الواضح أن خطوط القوة المتعاكسة بالاتجاه يضعف أحدها الآخر ، أما المتفقة في الاتجاه فيقوي أحدها الآخر .

نستطيع الآن بهذه الأفكار البسيطة عن خطوط القوة ، أن نصف اكتشاف أورستد فيزيائياً بدلاً من وصفه بدلالة دوران إبرة البوصلة . لنلاحظ ، أولاً أن اكتشاف اليونانيين للخواص المغنطيسية للحجر المغنطيسي التي توصلوا إليها من مشاهداتهم لسلوك هذا الحجر في حقل الأرض المغنطيسي يدل على مفهوم خطوط القوة في حقل مغنطيسي . ولكي ندرك هذا المفهوم ، نأخذ حقلاً مغنطيسياً (حقل الأرض المغنطيسي مثلاً في منطقة صغيرة من الفضاء أو نأخذ الحقل المغنطيسي بين سطحين منبسطين متوازيين في قطبين أحدهما جنوبي والآخر شمالي من مغنطيسين) . ونستطيع تصور هذا الحقل على أنه يشير إلى اتجاه محدد وأنه ممثل بخطوط قوة متوازية تتجه كلها في ذلك الاتجاه الذي يتعين بالمنحى الذي يتحرك فيه قطب شمالي لمغنطيس موضوع في الحقل . فإن وضع مغنطيس الآن على شكل قضيب (مكافىء للحجر المغنطيسي) في الحقل ليصنع زاوية معينة مع خطوط القوة ، فإنه يخضع عندئذ لعزم دوران ، لأن الحقل يجذب القطب الشمالي وفق خطوط القوة ويدفع القطب الجنوبي بقوة تساويها في اتجاه معاكس . ولما كانت هاتان القوتان المتعاكستان متساويتين شدة ولكنهما ليستا على المستقيم نفسه ، فهما تؤثران بعزم دوران على المغنطيس مما يسبب دورانه إلى أن يستقيم وفق خطوط الحقل . فهذا المثال البسيط الذي وضح كيف يتصرف مغنطيس في حقل مغنطيسي يبين لنا فائدة مفهوم خطوط القوة .

فإذا عدنا الآن إلى اكتشاف أورستد للمغنطيسية الناشئة عن تيار كهربائي يسهل علينا فهم الارتباك الذي خلفه هذا الاكتشاف في البداية . ففي الزمن الماضي قبل هذا الاكتشاف ، كانت الآثار المغنطيسية مرتبطة دائماً بوجود مغنطيس أو أقطاب مغنطيسية ، أما في هذه التجربة فثمة

مغنطيسية من دون مغنطيس. بيد أن مفهوم الحقل سهل قبول هذه المفارقة الظاهرية بمجرد إدخال فكرة المثنوية القائلة بأن الحقل المغنطيسي يمكن أن يتولد من مغنطيس أو من تيار كهربائي. ولكن التمييز بين هاتين الظاهرتين زال حين وحدهما مبدأ واحد (هو الآن حقيقة مسلم بها)، وهو أن الحقول المغنطيسية ليس لها وجود مستقل قائم بذاته، بل هي تتولد من تيارات كهربائية. وقد فسِّر الحقل المغنطيسي المرتبط بمغنطيس بوجود تيارات كهربائية جزيئية داخل المغنطيس نفسه. وكانت النتيجة المباشرة لهذا المفهوم أنه يمكن صنع مغنطيس بتكييف السلك الناقل للتيار بطريقة ما، وهذا ما يمكن عمله بأن نلف السلك الناقل للكهرباء على هيئة ملف لولبي (وشيعة) فتقوم الوشيعة عندئذ مقام مغنطيس له قطب مغنطيسي شمالي وآخر جنوبي. وتدعى هذه الوشيعة الناقلة للتيار، مغنطيساً كهربائياً، وهو أعظم ما ابتُكر من الأجهزة في تاريخ التقانة.

لقد أصبح بإمكاننا أن نستخدم الآن مفهوم خطوط القوة المغنطيسية لكي نستنتج منه بعض السمات الهامة في الحقل المغنطيسي المتولد من تيار يجري في سلك طويل مستقيم. وقد رأينا سابقاً أن اتجاه الحقل في أي نقطة خارج السلك يكون عمودياً على السلك (يصنع معه زاوية قائمة). لذلك نستنتج أن خطوط القوة في هذا الحقل هي دوائر متمركزة على السلك في مستوٍ عمودي عليه. وتتعلق شدة الحقل في نقطة ما واقعة خارج السلك بشدة التيار الكهربائي وبنصف قطر خط القوة (أي الدائرة) المار بهذه النقطة، فكلما اشتد التيار ازدادت شدة الحقل، وكلما كبر نصف قطر خط القوة (أي بعدت النقطة عن السلك) ضعف الحقل. وإذا وضعنا قطباً شمالياً في نقطة في الحقل المغنطيسي المتولد من هذا التيار، فإنه يتحرك في الاتجاه الذي تلتف فيه أصابع اليد اليمنى على السلك عندما يشير الإبهام فيها إلى اتجاه التيار، أما القطب الجنوبي فيتحرك في الاتجاه المعاكس. ونستطيع باستخدام هذه الطريقة أيضاً (أي باستخدام أصابع اليد اليمنى وإبهامها) أن نعين أقطاب مغنطيس كهربائي، فالابهام يشير إلى جهة القطب الشمالي إذا كانت الأصابع ملتفة حول الوشيعة في اتجاه تدفق التيار فيها.

ديناميك التيارات الكهربائية

أعقبت هذا الاكتشاف العظيم لأورستد فترة بُحِثت فيها التأثيرات المتبادلة بين التيارات بحثاً مكثفاً جداً تصدره عمل باهر قام به أ. م. أمبير André Marie Ampère الذي سميت وحدة شدة التيار باسمه. فقد لاحظ أمبير أن السلكين يتجاذبان إذا كانا ناقلين لتيارين في اتجاه واحد، ولكنهما يتنافران إذا كان التياران في اتجاهين متعاكسين، وهذا ما نستطيع تفسيره باستخدام خطوط القوة: إذ تتجه خطوط القوة المتولدة من كل تيار في اتجاه أصابع اليد اليمنى إذا كان إبهامها في اتجاه التيار في كل سلك. وهذا يعني أن خطوط القوة المتولدة من التيارين (المتفقين بالاتجاه) يفني أحدهما الآخر

في المنطقة الواقعة بين السلكين (وهذا ما يحدث تماماً إذا كانت شدتا التيارين متساويتين)، في حين أن خطوط القوة في الجانب الآخر من كل سلك تبقى على حالها وتعمل عمل الرباط المطاطي المشدود حول السلكين معاً فتجذب أحدهما نحو الآخر، وتعرف هذه الظاهرة باسم مفعول «القرص» Pinch الذي يستخدم في الأجهزة الحديثة الضخمة التي تسعى إلى توليد الطاقة النووية بدمج النوى الخفيفة (البروتونات أو الدوتيرونات أو نوى الهدروجين -3) لتكوين نوى الهليوم (أي ما يسمى الاندماج النووي الحراري).

إن اكتشاف هذه الخواص الديناميكية ذو أهمية فائقة بالنسبة إلى التقانة الكهرطيسية، لأن هذه الخواص أساس صناعة المحركات الكهربائية التي أحدثت ثورة عارمة في الصناعة كلها وحررت عمليات صناعية جبارة من حاجتها لأن تظل قريبة من مصادر طاقتها، إذ يتضح من قانون نيوتن الثالث في الفعل ورد الفعل أن اكتشاف أورستد يؤدي مباشرة إلى المحرك الكهربائي، لأنه إذا كان التيار الكهربائي يؤثر بقوة في مغنطيس يقع في جواره فكذلك يؤثر المغنطيس في السلك الناقل للتيار بقوة تساويها ولكن تعاكسها. وهكذا فإن السلك يتحرك بتأثير هذه القوة في اتجاه معاكس لاتجاه حركة المغنطيس. وإذا وضع ملفُّ سلكٍ ناقلٍ للتيار بجانب القطب الشمالي (أو الجنوبي) لمغنطيس ثابت فإن هذا المغنطيس يؤثر في الملف بعزم دوران، فيأخذ عندئذ بالدوران، وهكذا يتضح مباشرة الفعل المحرك للتيار الكهربائي.

وقد كان هذا الارتباط بين القوة المغنطيسية (أو الحقل المغنطيسي)، المتولدة من تيار، والقوة الكهربائية (أو الحقل الكهربائي) المتولدة من شحنة كهربائية، ارتباطاً محيراً في بادئ الأمر، لأن الشحنة الكهربائية الساكنة لا تبدي خواص مغنطيسية، وإذا وضعت بجانب قطب مغنطيسي، فإنه لا يكتشف أي منهما وجود الآخر، فلا الشحنة الكهربائية تحس بأنها واقعة في حقل مغنطيسي يولده القطب ولا القطب يحس بأنه واقع في حقل الشحنة الكهربائية. ولكن الفيزيائيين الذين جاؤوا بعد أورستد أدركوا هذه الرابطة التي تربط الحقلين، وهي الحركة النسبية بين الشحنة والقطب. فالتيار الكهربائي ما هو إلا جريان شحنات كهربائية، وهذا الجريان هو الرابطة الحاسمة بين وجود القطب المغنطيسي مع الشحنة الكهربائية من جهة، وحركة كل منهما بالنسبة إلى الآخر من جهة أخرى. فكما أشير سابقاً، إذا كان كل من الشحنة والقطب ساكناً بالنسبة للآخر فإنه لا يحدث تعارف بينهما، ولكن ما أن تتحرك الشحنة حتى تولد حقلاً مغنطيسياً فيستجيب له المغنطيس، وهذا هو التفسير الأساسي لاكتشاف أورستد، غير أنه لم يلق القبول الكامل إلا عندما بين هـ. رولاند Henry Rowland أن الشحنات الكهربائية الفردية تولد (بحركتها) حقلاً مغنطيسياً مماثلاً تماماً لذاك الذي يولده تيار كهربائي.

يشير تفسير اكتشاف أورستد على هذا النحو (أي أنه ثمرة شحنة كهربائية وحركتها) إلى

وجود تناظر مهم بين الكهرباء والمغنطيسية، إلا أن هذا لم يكتشف تماماً ولم يفهم إلا بعد ما يقرب من عشر سنوات حين ولَّد فرادي التحريض المغنطيسي، فوجود مثل هذا التناظر يُستدل عليه من قانون نيوتن الثالث في الفعل ورد الفعل، إذ لما كانت الشحنة المتحركة تؤثر بقوة في المغنطيس (لأنها تولد حقلاً مغنطيسياً في جوار المغنطيس)، فلا بد أن يؤثر المغنطيس بقوة مساوية لها ومعاكسة في الشحنة المتحركة. ولكن الشحنة الكهربائية لا تستجيب إلا للحقل الكهربائي، الأمر الذي يعني أن المغنطيس المتحرك يولد حقلاً كهربائياً. ولا بد أن نلاحظ هنا أنْ لا وزن في كل ذلك إلا للحركة النسبية بين المغنطيس والشحنة. لذلك، إذا تحركا معاً (بسرعة واحدة وفي اتجاه واحد) فعندئذ لا يتعرف أحدهما الآخر، ولكن الحركة النسبية تعني أنه تحدث الآثار نفسها في المغْنطيس وفي الشحنة سواء أأبقينا المغنطيس ثابتاً وحركنا الشحنة أم أبقينا الشحنة ثابتة وحركنا المغنطيس. ففي أي من الحالين تؤثر في كل منهما قوة سنتحدث عنها بالتفصيل في الفصل التالي حيث نشرح بحوث فرادي ومكسويل في الكهرطيسية.

ومما يسهِّل دراسة التيارات الكهربائية إدخال الكمون الكهراكدي الذي سبق أن سهل أيضاً نظرية الحقل الكهرساكن. إذ يعرف الكمون الكهراكدي بحيث تتحرك الشحنات في الحقل الكهربائي من النقاط ذات الكمون الأعلى إلى النقاط ذات الكمون الأخفض، الأمر الذي يعني أن الشحنات الكهربائية تجري من حالات الطاقة الأعلى إلى حالات الطاقة الأخفض. ولما كان التيار الكهربائي هو جريان شحنات كهربائية لذلك نتصور هذا الجريان على أنه نتيجة فرق في الكمون بين أي نقطتين من نقاط الدارة، فيمكن عندئذ أن يتحدث المرء عن «الهبوط الكموني» بين النقطتين في الدارة.

ويأتي تطبيق مفهوم الكمون على الدارات الكهربائية نتيجة طبيعية للطريقة التي ولد فيها فولطا تياراً كهربائياً بوعائه (خليته) الكيمياوي. فقد كانت ميزات هذا الوعاء الأساسية وجود مسريين معدنيين مختلفين (التوتياء مثلاً والنحاس) مغموسين في وسط حامضي (كحمض الكبريت مثلاً)، فيكتسب كل مسرى شحنة كهربائية إذ إن الحمض ينتزع من سطحه إيونات (هي ذرات ذات شحنة موجبة) تخلف في المسرى زيادة في الشحنة السالبة. وتنتقل إيونات التوتياء إلى المحلول بسرعة أكثر كثيراً من انتقال إيونات النحاس، فتصبح شحنة التوتياء السالبة، عند حدوث التوازن بين المسريين والحمض، أكبر من شحنة المسرى النحاسي. وهكذا يصبح كمون المسرى النحاسي موجباً بالنسبة إلى مسرى التوتياء (لأن شحنته السالبة أقل)، فإذا كان المسريان متصلين بموصل (سلك معدني) أمكن القول عندئذ أن تياراً كهربائياً يجري من النحاس (الذي يدعى القطب الموجب في الوعاء) إلى التوتياء. والواقع أن الشحنات الكهربائية تجري من التوتياء إلى النحاس، ومع ذلك يوصف التيار لأسباب تاريخية بأنه يسري من النحاس إلى التوتياء (أي من الكمون الأعلى إلى

الكمون الأخفض). ولما كان جريان الشحنة هذا يمثل هبوطاً في الطاقة، لذلك لا يمكن إبقاء التيار مستمراً إلا إذا غُذيت الدارة بطاقة تُستمد من الحمض بصورة طاقة كيمياوية. فالوعاء الكهربائي جهاز يعتمد على تحويل الطاقة الكيمياوية إلى طاقة كهربائية (وهو عمل يقوم به الحمض على كل مسرى بأن يلزم إيونات التوتياء والنحاس على الانتقال إلى المحلول فيحدث بذلك فرق في الكمون بين المسريين) وتكون الطاقة بذلك مقترنة بتيار كهربائي «وتتوقف على شدة هذا التيار»، فكلما ازدادت شدته ازداد محتواه من الطاقة.

وتكشف هذه الطاقة عن نفسها بطرائق مختلفة، فيظهر جانب منها في الحقل المغنطيسي الذي يرافق التيار، والذي يتضح من حركة مغنطيس موضوع في جوار التيار (أي اكتسابه طاقة حركية)، ويظهر جانب آخر في طاقة حركية للشحنات الكهربائية التي تجري في التيار، فتولد هذه الطاقة الحركية الأخيرة حرارة في الدارة الكهربائية، لأن الشحنات الخفيفة المتحركة التي تسبب التيار تصطدم اصطداماً مستمراً بالذرات الثقيلة الساكنة إلى حد ما في الدارة، فتقاوم بذلك حركات الشحنات، وهذه المقاومة هي التي تسبب الحرارة الناشئة عن التيار. وهكذا يتضح كيف جرى تطور نظرية الدارة الكهربائية والتقانة بسرعة كبيرة جداً نتيجة إدخال مفهوم فرق الكمون بين نقطتين في الدارة الكهربائية. وسنقتصر هنا على عرض الأفكار الأساسية التي اقترنت باسم ج. س. أوم Georg Simon Ohm (قانون أوم) و غ. ر. كيرشوف G.R.Kirchoff (قانون كيرشوف في الدارات).

يربط قانون أوم مقدار شدة التيار بفرق الكمون بين النقطة التي بدأ منها التيار والنقطة التي انتهى عندها، وكذلك بمقاومة المادة التي جرى فيها التيار، فهو قانون أساسي لفهم جريان التيارات الكهربائية في مختلف المواد. والصيغة البسيطة التي تعبر عنه هي الأساس في عمل الكهربائي الذي يهتدي بها في كل أعماله، ولولا هذا القانون لما أمكن تعميم الكهرباء في العالم تعميماً واسعاً غيّر الحياة على وجه الأرض تغييراً جذرياً. لقد رأينا أنه إذا غمس معدنان مختلفان (مسريان) في حمض فإنهما يكتسبان مقدارين مختلفين من الشحنة السالبة، وينشأ عن ذلك فرق كمون يولد تياراً في أي سلك معدني يصل بين المسريين. وتتوقف شدة هذا التيار على مقدار فرق الكمون المذكور وعلى مقاومة السلك الذي تجري فيه الشحنة الكهربائية، فيشتد التيار كلما كبر فرق الكمون ويضعف كلما ازدادت المقاومة. وهذه العلاقة هي أساس قانون أوم الذي ينص عليه بوجه عام كما يلي: إن فرق الكمون اللازم لتسيير تيار كهربائي معين في سلك معين يساوي جداء شدة هذا التيار في مقاومة السلك. ويعبر عن هذا القانون جبرياً كما يلي: $V = IR$ (V: فرق الكمون أو التوتر، وI: شدة التيار، وR: مقدار المقاومة). ويعبر عن الكميات V وI وR في هذه الصيغة بوحدات عملية لن نربطها هنا مباشرة بوحداتنا الأساسية في الطول والزمن والكتلة (أو القوة) التي نُظِّم ميكانيك

نيوتن في ضوئها . والسبب في هذا التعارض هو أن التيار وفرق الكمون مرتبطان بالشحنة الكهربائية (إذ إن شدة التيار هي شحنة كهربائية في الثانية والكمون طاقة وحدة الشحنة الكهربائية) ، ولم يسبق أن عبرنا عن الشحنة الكهربائية بهذه الوحدات كما يتضح من المثال التالي : إن القوة التي هي جداء الكتلة في التسارع تساوي مربع شحنة كهربائية على مربع مسافة (بحسب قانون كولون) ، فالشحنة الكهربائية تساوي إذاً جداء مسافة في الجذر التربيعي لقوة ، أو هي حاصل قسمة جداء مسافة في الجذر التربيعي لكتلة على جداء زمن في الجذر التربيعي لمسافة .

ولما كان التعبير عن الشحنة الكهربائية بالوحدات الأساسية (المكان والزمان والكتلة) معقداً على هذا النحو ، فصيغة أبعاد الكمون والتيار بدلالة الوحدات الأساسية هي أيضاً معقدة في الأغراض العملية . لذلك تستعمل مجموعة وحدات أساسية مختلفة في الكهرباء ، وهي : الكولون للشحنة والفلط لفرق الكمون والأمبير لشدة التيار والأوم للمقاومة ، ويغدو قانون أوم بهذه الوحدات على النحو التالي فلطات = أمبيرات × أومات . وتعني هذه الصيغة أنه إذا كان فرق الكمون بين نقطتين على سلك ناقل للتيار 1 فلط ومقاومة هذا المقطع من السلك 1 أوم ، فإن شدة التيار في السلك تساوي 1 أمبير . ويستطيع المرء أن يحسب من الصيغة $I = V / R$ ، شدة التيار في سلك إذا عرف فرق الكمون بين طرفيه ومقاومته ، علماً بأن التيار الذي شدته 1 أمبير يعني أنه تجري في أي مقطع عرضاني في الدارة شحنة كهربائية مقدارها 1 كولون في الثانية . ولما كان $V = IR$ لذلك يتحدث الكهربائي في هبوط IR من نقطة إلى أخرى على طول التيار بدلاً من أن يتحدث عن هبوط التوتر (فرق الكمون) .

وتتوقف مقاومة السلك الكهربائية على طبيعته الكيمياوية (هل هو ذهب مثلاً أم فضة أم نحاس . .) وعلى درجة حرارته (فكلما انخفضت درجة حرارته خفت بوجه عام مقاومته) ، وعلى طوله وقطره (فكلما كان السلك أطول وأدق زادت مقاومته) ، وتعرف وحدة المقاومة ، أي الأوم ، بأنها مقاومة عمود منتظم من الزئبق طوله 300 106 سم ومقطعه العرضي جزء من مئة من السنتمتر المربع ودرجة حرارته 0° درجة سلزيوس (درجة مئوية) .

ولما كان التيار جريان شحنات كهربائية ، فهو يحمل طاقة هي طاقة شحناته الحركية ، ولو كان السلك عديم المقاومة ، لظل التيار ، إذا جرى فيه ، يستمر جريانه إلى الأبد ما دامت الشحنات لا تفقد شيئاً من طاقتها الحركية . لذلك لا بد من إبقاء فرق كمون ثابت على طول السلك لكي يستمر جريان التيار . أما الطاقة التي تفقدها الشحنات المتحركة بسبب المقاومة فتظهر على صورة حرارة في الدارة يعطى معدلها الناتج (في وحدة الزمن) بالقيمة I^2R ، أي جداء مربع شدة التيار في المقاومة .

ويمكن لهذه الطاقة التي يحملها التيار الكهربائي أن تحدث تفاعلات كيمياوية وأن تسيّر

محركات وتضخم عمليات إلكترونية وأشياء أخرى كثيرة ومفيدة . ومعدل الطاقة التي يولدها تيار كهربائي (في وحدة الزمن) تقاس بالواط . وتساوي IV ، أي جداء شدة التيار في التوتر . فالتيار الذي شدته 1 أمبير والذي يجري بين نقطتين فرق الكمون بينهما 1 فولط ، يكون معدل إنتاجه من الطاقة 1 واط ، الأمر الذي يعني أنه ينتج 1 جول (10 ملايين إرغة) في الثانية أو أقل بقليل من $\frac{1}{4}$ حريرة في الثانية . علماً بأن الأرغة هي الطاقة الحركية لكتلة 2 غ تسير بسرعة 1 سم / ثا ، والحريرة هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 غرام من الماء درجة سلزيوس (مئوية) واحدة .

وتتخذ قوانين كيرشوف أساساً لنظرية الدارات بأكملها ، فهي لا غنى عنها لتحليل الدارات المعقدة ، مثل تلك المستعملة في الحاسبات ومختلف أجهزة الاتصالات . وينص أول قانون من قوانين كيرشوف على أن مجموع شدات التيارات المقتربة من نقطة تفرع في الدارات تساوي مجموع شدات التيارات المبتعدة عنها . وهذا يعني أنه لا يمكن أن تتجمع الشحنة الكهربائية في أي نقطة في الدارة . وينص قانون كيرشوف الثاني على أن هبوط IR على طول أي خيطة (دورة مغلقة) في الدارة يجب أن يساوي الصفر ، وهذا يكافىء قولنا أن هبوط الكمون بين نقطتين لا على التعيين من دارة هو نفسه سواء أكانت النقطتان موصولتين بناقل واحد أم بعدد من مختلف النواقل .

ومع أن اكتشاف التيار الكهربائي ومرافقه الحقل المغنطيسي كان بداية نشوء التقانة الكهرطيسية ، فإنه لا يظهر إلا نصف الطبيعة الرائعة للمثنوية الكهرطيسية ، أما النصف الثاني لهذه المثنوية فسنصفه في الفصل التالي .

عصر فرادي ــ مكسويل

«لأن تبدأ الحقائق الجديدة كهرطقات وتنتهي كخرافات فذلك قدرها المعتاد».
ــ ت. هـ. هكسلي*

كان ميتشل فرادي (1791-1867) أحد أبرز العلماء في كل العصور، وهو لم يتلقَ أي تعليم نظامي بل تعلم بنفسه ما كفى من العلم ليصبح أبرز فيزيائي تجريبي في عصره، فقد اعتمد على بصيرته وحدسه أكثر مما اعتمد على معارفه النظرية، لا سيما أنه لم يتلقَ سوى القليل من التدريب في الرياضيات، وكان، كمن يتلمس طريقه في الظلام، يجهد في ابتكار عددٍ من التجارب وإنجازها مما مكّن جيمس كلارك مكسويل فيما بعد من استنتاج معادلاته الرياضية لتوحيد الحقلين الكهربائي والمغنطيسي في كيان واحد.

ولد فرادي، وهو ابن حداد، في إحدى الضواحي الفقيرة الوسخة في لندن، ولم يكن شائعاً بين أبناء الطبقة العاملة في ذلك الزمان أن يكونوا متعلمين، بل كانوا يُتركون وشأنهم في تلقي التعليم النظامي، فكان هذا حال ميتشل قبل أن يصبح صبياً متمرناً عند مجلد كتب حيث أتيح له وهو في الثالثة عشر من عمره أن يقرأ العديد من الكتب التي كان يبدي دائماً اهتماماً شديداً بقراءتها على الرغم من فقر عائلته. ولكنه لم يجد طيلة حياته متعة في الرياضيات، إذ ربما كان يرى أن براهينها المفصلة ومنطقها الصارم لم تكن لتلائم ذوقه.

كان فرادي عاملاً مجداً في المكتبة، ومع ذلك كان يقضي ما يفيض من وقته في قراءة الكتب التي كانت ترد إلى المكتبة لتجليدها. وكان أكثر ما أثر فيه كتاب سهل الفهم في الكيمياء، اطلع

* T.H.Huxley (1815-1895) أعظم عالم أحياء إنكليزي في القرن التاسع عشر عُرف عنه تأييده القوي لنظرية دارون في النشوء والارتقاء وكان له عدة كتب في فروع علم الحيوان المختلفة.

فيه فرادي على طرائق هذا الموضوع ومصطلحاته وكوّن عنه معرفة أوليه . ولما لم يكن ميالاً أبداً لعمله في تجليد الكتب ، على الرغم من وجود صانعيْن يساعدانه في عمله ، فإنه راح يبحث عن مهنة أخرى تشبع فضوله الفكري قبل أن يبلغ العشرين . واتضح الأمر لفرادي بعد أن شهد سلسلة من المحاضرات العلمية في المجمع الملكي أقنعته أن مبتغاه الحقيقي هو العلم . وكان فرادي قد ذهب بعد أن أنهى تدريبه على التجليد في عام 1812 للعمل في مكتبة أخرى لبضعة أشهر ، لكنه كان قد اقتنع في ذلك الحين أنه لن يكون سعيداً أبداً بعمله في التجليد ، وكان مخدومه الجديد غير متعاطف مع تعاظم اهتمام فرادي بالعلم ، فحاول أن يثنيه عن ترك عمله في التجليد ، ولكن معاداة مخدومه لم تؤدِ إلا إلى تقوية عزيمته على الالتحاق بما كان يُؤمن أنه مبتغاه الحقيقي .

ولم يكن لدى فرادي مستند أكاديمي يزكي به نفسه ، لذلك أرسل إلى الكيميائي البريطاني السير همفري ديفي Sir Humphrey Davy مجموعة المذكرات التي سجلها حين استمع إلى عدة محاضرات ألقاها السير ديفي في المجمع ، فقُبل طلبه أخيراً بعد أن كرر طلباته ، فاستخدمه ديفي مساعداً مخبرياً له في المجمع الملكي عام 1813 عندما تعرّف ومضات الألمعية في المذكرات التي أرسلها فرادي له ، ورفض نصيحة صديق له بأن يبدأ عمل فرادي كمستخدم يغسل الأواني الزجاجية وعزز مركزه في وظيفته .



ميتشل فرادي (1791-1867)

وكان عمله كمستخدم مختبري يتميز بعنايته الواضحة وانتباهه للتفاصيل، كما كان يستمع إلى محاضرات المجمع باهتمام، وبدأ يفكر كيف يستطيع إعداد التجارب التي كان ينوي القيام بها، فأعيد تعيينه في المجمع بعد ثلاث سنوات، أي في عام 1816، وهو العام الذي نشر فيه بحثه العلمي الأول الذي لفت انتباه المجتمع العلمي في بريطانيا وأدى إلى انتخابه في الجمعية الملكية عام 1824. وقد تميزت هذه المرحلة من حياته ببداية عمله في التجارب الكهربائية والكيمياوية التي بلغت أوجها باكتشافه التحريض الكهرطيسي.

وعلى الرغم من تفاني فرادي في عمله ومعرفته الأكيدة بقدراته الخاصة العظيمة فقد كان متسامحاً مع آراء الآخرين ومحباً للأطفال بوجه خاص، حتى أنه قدم سلسلة من المحاضرات في مبادئ العلوم كان قد كتبها بصورة خاصة للناشئين؛ كما كان شديد التمسك بالدين وينتمي إلى طائفة تؤمن بأن في كلمات المسيح هداية كافية ليحيى المرء حياة مسيحية، فلم يكن يميل كثيراً بالتالي للدين المنتظم وقلما أقدم على مجازفة في الكنيسة. وقد ساعدته معتقداته الدينية على المثابرة في عمله على الرغم من أنه كان يعاني دائماً من أوجاع في الرأس وفقدان الذاكرة حتى «لقد أصبحت هذه الأعراض بين عامي 1831 و1840 مؤلمة جداً، وكان هو نفسه يعتقد بأنه ما من طبيب يفهم علته لأنه كان مقتنعاً بأنه يعاني من تفكك في قدراته العقلية الجسدية، وأنه ما من وسيلة لإيقاف هذا التلف والتدهور. ومع ذلك وعلى الرغم من تفاقم علته التي كانت تجعله أحياناً مشلول الذاكرة، فقد ظلت قدراته الإبداعية عظيمة كما هي دائماً، واستمر إنتاجه حتى توفي بعد ظهر يوم 25 آب/أغسطس 1867 بعد شهر واحد فحسب من ذكرى ميلاده السادس والسبعين»[1].

كانت تجارب كريستيان أورستد التي أظهرت انحراف الإبرة المغنطيسية بتأثير التيار الكهربائي هي الباعث الأول على اكتشاف فرادي التحريض الكهرطيسي إذ إنه كان أحد القلائل الذين فكروا بالقيام بعمل معاكس، وتساءلوا عن التأثير الذي، إن وُجد، يمكن أن تخلّفه قوة مغنطيسية في تيار كهربائي[1]. وقد قادته تجاربه في هذا الميدان إلى صياغة مفهوم الحقل بصفته طريقة لتفسير التفاعل بين المغنطيس والتيار الكهربائي. وما دفعه إلى القول بمفهوم الحقل، الذي استمرت سيطرته على معظم قطاعات الفيزياء حتى وقتنا الحاضر، هو رغبته في أن يتجنب فكرة نيوتن في التأثير عن بعد «واعتقاده بأن التأثيرات الفيزيائية كلها واحدة في أساسها، أي اعتقاده بفكرة الحقل الموحد»[3].

لقد اكتشف فرادي ظاهرة التحريض الكهرطيسي في عام 1854 وكتب حينذاك يقول «كان لي، منذ أمد بعيد، رأي يكاد يبلغ حد الإيمان بأن مختلف الصور التي تظهر فيها أنواع المادة لها أصل مشترك، أو هي بعبارة أخرى، مترابطة ترابطاً مباشراً ومتعلقة بعضاً ببعض حتى ليبدو أنه يمكن تحويل إحداها إلى الأخرى، وأنها قوى متكافئة في تأثيراتها»[2]. وقد بدأ فرادي بعد هذا

الاكتشاف سلسلة كيميائية من التجارب التي ساقته إلى قوانين التحليل الكهربائي وقدمت أول دلالة واضحة بشأن طبيعة القوى التي تربط الذرات بعضاً ببعض داخل الجزيئات. وخلص فرادي من هذه التجارب إلى أن «القوى الكهربائية تقوم بعمل داخل الجزيء، إذ فكر بأنه إذا كان بالإمكان الحصول على تيار كهربائي من وعاء فولطائي يعمل نتيجة تفاعل كيمياوي بين المسريين والمحلول الكيمياوي، فلا بد إذاً أن تكون الشحنات موجودة في ذرات المحلول، وقد وجد فرادي أن التيارات ذات الشحنة الواحدة التي جعلها تجري في المحاليل تحلّل الكمية نفسها من المادة أو العدد نفسه من إيونات مركب كيمياوي معيّن. كما استنتج بعد ذلك أن «جميع شحنات الإيونات هي مضاعفات صحيحة لشحنة أساسية واحدة، وأنه ليس بالإمكان إيجاد أجزاء كسرية من هذه الشحنة»[2]. كما كشف عمله أن بالإمكان الحصول على كمية كبيرة من الكهرباء من اتحاد كميات صغيرة جداً من الذرات، وأظهر بذلك أن القوى الكهربائية بين الإيونات كبيرة جداً»[3].

وفي عام 1824 اكتشف فرادي البنزين Benzene إضافة إلى الخواص الكيمياوية والفيزيائية لبعض المركبات العضوية مثل البوتيلين Butylene والإتيلين؛ غير أنه كان مشدوداً إلى دراسة الكهرباء لأنها وفرت له فرصة البحث في الفيزياء كما في الكيمياء التي ظل متعلقاً بها طيلة حياته. ومما يدل على مهارته الفائقة في الكيمياء دراساته الكهركيميائية التي أرست أسس الكهركيمياء وأثبتت ذرية الشحنة الكهربائية. وقد أنجز أيضاً تجارب عديدة في الكهرباء الراكدة قبل أن يكتشف التحريض الكهرطيسي الذي أظهر به تناظر الكهرطيسية الكامل الذي دلت عليه أول الأمر أعمال أورستد. ولكن فرادي لم يكن يملك سوى أساس هزيل من الرياضيات، إضافة إلى ارتيابه أساساً في أن تكون النماذج الرياضية وصفاً صادقاً لظواهر الطبيعة، لذلك طور نماذجه الفيزيائية الخاصة لكي يفسر نتائج تجاربه مما أدى به في النهاية بصورة تلقائية إلى مفهوم الحقلين الكهربائي والمغنطيسي اللذين تصورهما كيانين واقعيين فيزيائيين. ولكي يفسر التأثير المتبادل بين الشحنات الكهربائية (أو المغنطيسية) أدخل مفهوم «أنبوب القوة» الذي يمتد من شحنة إلى أخرى فينتقل بذلك التأثير المتبادل بين الشحنات بدون أن يترتب عليه أن يناصر فكرة التأثير عن بعد البغيضة التي لم يقبلها مثلما لم يقبلها نيوتن الذي نبذها بقوله: «إنها منافية للعقل إلى حد أني لا أصدق أن هناك أحد، ممن لديه المقدرة الكافية للتأمل في المجالات الفلسفية، يمكن أن يأخذ بها على الإطلاق»[1].

والآن دعونا نذكر باختصار شيئاً عن إنجازات فرادي لا سيما تجاربه في الكيمياء الكهربائية ثم نعود بعدئذ إلى دراسة أعظم إنجازاته العلمية وهو اكتشافه التحريض الكهرطيسي، فقد بدأ فرادي عمله الكهرطيسي بتجارب في الكهرباء الراكدة والمغنطيسية الراكدة، وبرهن تجريبياً على عدد من الحقائق الأساسية التي استنتجها من فكرته عن خطوط القوة (أو أنابيب القوة)، إذ افترض أن عدد خطوط القوة الصادرة عن شحنة كهربائية تتناسب مع مقدار هذه الشحنة، وأثبت بذلك أن شدة

الحقل (الكهربائي أو المغنطيسي) في كل نقطة منه متناسبة مع مقدار هذه الشحنة (أو القطب). وهذه العلاقة هي قانون التربيع العكسي الذي اكتشف كولون أنه يعطي قوة شحنة كهربائية.

وقد برهن فرادي كذلك على خلاصة أخرى في الكهرباء الراكدة هي تلك التي تقول أن الشحنات الكهربائية تتولد أزواجاً متساوية ومتعاكسة (فترافق كل شحنة موجبة شحنة سالبة تساويها). وكانت طريقته في ذلك أنه أدخل شحنة كهربائية موجبة في سطل جليد وبيّن أن شحنة موجبة أخرى تساويها قد تولدت على سطح السطل الخارجي، وأن هذه الشحنة تبقى على حالها عند تحريك الشحنة الموجبة الأُولى داخل السطل دون أن تلامَسه. ففسر فرادي هذه النتيجة بأن تصور خطوط القوة الصادرة عن الشحنة الموجبة المدخلة قد ربطت نفسها بالشحنات الكهربائية السالبة الموجودة على السطح الداخلي للسطل مما أدى إلى تحرك الشحنات الموجبة في معدن السطل إلى سطحه الخارجي بسبب تنافرها. وهكذا يولِّد كل خط قوة (صادر عن الشحنة الموجبة المدخلة) شحنة تساويها على سطحه الخارجي. وهذه النتيجة هي التي قادت فرادي إلى مفهومه عن الذرة بصفتها بنية تتماسك جسيماتها المكونة لها كلها معاً بتأثير قوى كهربائية.

وقد نص على هذه الفكرة الهامة في إحدى نشرات بحثه التجريبي في الكهرباء كما يلي: «على الرغم من أننا لا نعرف شيئاً عما هي الذرة فإننا مع ذلك لا نستطيع إلا أن نُكَون فكرةً ما عن جسيم صغير يصوِّرها لعقلنا؛ كما أن جهلنا في الكهرباء هو مثل ذلك، إن لم يكن أعظم منه، لدرجة أننا عاجزون عن القول هل الذرة مادة خاصة أو مواد خاصة أم هي مجرد حركة مادة عادية أم أنها نوع ثالث من القوى أو العوامل. ومع ذلك فثمة وقائع لا حصر لها تسوّغ اعتقادنا بأن الذرات في المادة مزودة بطريقةٍ ما بقوى كهربائية أو مقترنة بها، وبأن أكثر الخواص أهمية فيها ناشئة عن هذه القوى ومنها التآلف الكيمياوي المتبادل بينها»[3]. ولقد أثبتت تجارب فرادي الكهركيمياوية هذه الظنون، كما أنها كانت أولى الدلالات على أن الشحنات الكهربائية تتكون من مضاعفات (موجبة أو سالبة) لوحدة شحنة أساسية هي التي بُرهن بعد عدد من السنين على أنها شحنة الإلكترون التي تسمى الآن الشحنة الكهربائية «الأولية» (أو الوحدة الأولية)، علماً بأن الجسيمات الأولية التي يخمَّن وجودها اليوم (والتي تُدعى كواركات Quarks) تحمل شحنات جزئية من هذه الوحدة الأولية (أي من شحنة الإلكترون)، وسندرس هذه الكواركات في الفصل 19.

وكان فراديَ قد اكتشف في بحوثه الكهركيمياوية قانوناً أساسياً ينص على أن كمية المادة المنطلقة عند أحد المسريين في مدة معينة تتوقف على كمية الشحنة الكهربائية الكلية التي حملها التيار الكهربائي عند مروره في الإلكتروليت (أي المحلول الملحي). وهذا ما كان يعني لفرادي أن الأملاح تتفكك إلى ذراتها المكونة لها (إيوناتها) المشحونة كهربائياً والتي تحمل كل منها شحنة أولية واحدة أو اثنتين أو ثلاثاً أو أكثر من وحدات الشحنة الأولية، علماً بأن كل إيونات النوع الواحد

تحمل الشحنة نفسها (الموجبة أو السالبة).

ويتضح هذا القانون الأساسي بمثال بسيط: ففي محلول كلور الصوديوم (الملح) تتفكك جزيئات هذا الملح إلى إيونات الصوديوم الموجبة، وإلى إيونات الكلور السالبة، ويحمل كل إيون من هذه الإيونات شحنة أولية، فتنجذب إيونات الصوديوم الموجبة نحو المسرى السالب (المهبط Cathode) الغاطس في المحلول، وتنجذب إيونات الكلور السالبة نحو المسرى الموجب (المصعد Anode)؛ وهكذا يجري تيار ذو شدة معينة في المحلول الملحي ويرسّب على المهبط عدداً من إيونات الصوديوم بقدر ما يرسب من إيونات الكلور على المصعد ولكن كميتي الصوديوم والكلور المترسبتين ليستا متساويتين بالكتلة، لأن كتلة ذرة الصوديوم لا تساوي كتلة ذرة الكلور، والنسبة بينهما كنسبة 23 إلى 35 (نسبة وزنيهما الذريين) فكل 23 غراماً من الصوديوم المترسبة في زمن معين يترسب مقابلها 35 غراماً من الكلور. وقد وجد فرادي أنه إذا كان كل إيون يحمل وحدة شحنة (أولية)، فإن كتلة إيون أي ذرة رسّبت التيار على المسرى تتناسب مع وزنها الذري؛ فإيونات النحاس مثلاً يحمل كل منها وحدتي شحنة، فالتيار نفسه الذي يرسب 23 غراماً من الصوديوم يرسّب في المدة نفسها 32 غراماً من النحاس (أي نصف القيمة العددية لوزن النحاس الذري)، إذ لما كان كل إيون من النحاس يحمل وحدتيْ شحنة (أوليتين)، فهو ينقل إذاً في التيار شحنة تساوي ضعفي ما ينقله إيون الصوديوم؛ وفي مدة معينة يترسب في المحلول إيونات من النحاس بنصف عدد ما يترسب من إيونات الصوديوم. ويقوم عدد وحدات الشحنة الكهربائية التي يحملها إيون ذرة معينة بدور مهم جداً في الكيمياء ويدعى «تكافؤ Valence» الذرة (أو قيمتها الاتحادية).

وهكذا اقتنع فرادي من تجاربه الكهركيمياوية بأن المادة تتألف من أنواع مختلفة من الذرات، وبأن كل ذرة هي بنية متعادلة كهربائياً إذ فيها من وحدات الشحنة الكهربائية الموجبة عدد يساوي عدد الشحنات السالبة، وبأن هذه الشحنات هي مضاعفات لوحدة شحنة أولية أساسية. ولكنه لم يستطع أن يقيس هذه الوحدة وإنما قاس نسبتها إلى كتلة ذرة واحدة، واكتشف أن هذا العدد في حالة إيون الهدروجين أكبر منه في أي إيون آخر مما يدل على أن كتلة ذرة الهدروجين أصغر من كتلة أي ذرة أخرى.

اكتشاف التحريض الكهرطيسي

كانت بحوث فرادي الكهراكدية والكهركيماوية كافية لإبرازه عالماً عظيماً بين الفيزيائيين التجريبيين، إلا أنه اشتُهر أكثر ما اشتهر باكتشافه التحريض الكهرطيسي فاعتقاده العميق بوحدة قوانين الطبيعة جعلته على يقين بأن اكتشاف أورستد للحقل المغنطيسي المتولد من تيار كهربائي لا يصور سوى نصف قصة العلاقة بين الكهرباء والمغنطيسية؛ فكان متأكداً بأن المغنطيس لا بد أن

يولّد حقلاً كهربائياً مثلما يولّد التيار الكهربائي حقلاً مغنطيسياً. إلا أنه تعثر عند متابعته لهذه الفكرة، إذ حاول أن يولد حقلاً كهربائياً بمغانط ساكنة، فأغفل بعمله هذا دور الحركة المهم في العلاقة بين الكهرباء والمغنطيسية، لأن التيار الكهربائي هو جريان شحنات كهربائية (شحنات كهربائية متحركة)، وهذه الحركة هي العامل الحاسم في توليد الحقل المغنطيسي بالشحنات الكهربائية.

وليس مهماً أن يكون فرادي قد حقق اكتشافه مصادفة أم بعد تحليل واعٍ لتجربة أورستد، وإنما المهم أن قانونه في التحريض الكهرطيسي كان تقدماً مفاجئاً عظيماً في العلم البحت كما هو في الكهرطيسية أيضاً، بل هو حقاً تقدم في جميع التقانات الأخرى، فقد أكمل التحريض الكهرطيسي حلقة الاكتشافات التي بدأها أورستد ثم اتخذها مكسويل أساساً بنى عليه نظريته الكهرطيسية الرائعة، لذلك يُعد اكتشاف فرادي بداية عصر جديد في تاريخ العلم.

لقد اكتشف فرادي، مصادفة أو توقعاً، أنه إذا حرك مغنطيساً بجانب سلك ناقل على شكل حلقة، فإن تياراً كهربائياً يجري فيه وإن كانت الحركة بطيئة؛ أما إذا أبقى المغنطيس ساكناً بجانب الحلقة، أو حركَ الاثنين معاً بالطريقة نفسها تماماً، فإنه لا يحدث شيء. أما إذا حرك المغنطيس وثبَّت الحلقة، أو إذا حرك الحلقةَ وثبت المغنطيس فإن تياراً يجري فيها. فما يهم إذاً هو الحركة النسبية بين المغنطيس والحلقة، كما تتوقف جهة التيار أيضاً على جهة هذه الحركة النسبية، أي تنعكس جهة التيار إذا انعكست جهة الحركة النسبية.

وقد شرح فرادي هذه الظاهرة بلغته التي تتحدث عن خطوط القوة أو أنابيب القوة، فتخيل أن هذه الخطوط (أو الأنابيب) تخترق أو تملأ سطح الدائرة التي تكوِّنها الحلقة، وقال إنه عندما يتحرك السلك حاصداً أنابيب (أو خطوط) القوة فإن تياراً يتولد فيه، ثم صاغ هذه الفكرة على صورة قانون يحدد بدقة مقدار التيار الناشىء عن حصد خطوط قوة حقل مغنطيسي بسلك وعبَّر عن هذا القانون بدلالة فرق الكمون بين طرفي السلك. ويمكن فهم ذلك جيداً بأن نتصور سلكاً ناقلاً على صورة مستطيل يمكن أن نزلق أحد أضلاعه في اتجاه عمودي على منحاه وعلى امتداد الضلعين الملامستين له؛ فإذا وضع هذا السلك المستطيل الشكل بين القطبين الشمالي والجنوبي لمغنطيسين شاقوليين بصورة تكون معها خطوط قوة حقلهما المغنطيسي عمودية على سطح المستطيل فإن تياراً كهربائياً يجري في الدارة المستطيلة عندما يُحرك السلك أفقياً عبر الحقل المغنطيسي حاصداً خطوط القوة. وينص قانون فرادي في التحريض الكهرطيسي على أن مقدار فرق الكمون بين طرفي السلك المتحرك يتناسب مع سرعة حصد السلك لخطوط القوة المغنطيسية، ولكن غالباً ما يُنص على هذا القانون بطريقة تختلف عن تلك بعض الاختلاف، فيصوِّر الحقلَ المغنطيسي على أنه تدفق يمر عبر السطح المستطيل وأن التدفق يتغير عند تحريك السلك بسبب تناقص التدفق عبر مساحة

المستطيل، فينص قانون فرادي عندئذ على أن فرق الكمون الناشىء بين طرفي السلك المتحرك يتناسب مع سرعة تغير التدفق المغنطيسي. وهذا القانون المدهش ببساطته هو الذي يُعد أساس المولدات الكهربائية التي تتألف أساساً من سلك ملتف على هيئة وشيعة كبيرة تدور في حقل مغنطيسي قوي بحيث تخترق سطح كل لفة في الوشيعة خطوطُ القوة المغنطيسية؛ فكلما ازدادت سرعة دوران الوشيعة وكان المغنطيس أقوى، ازدادت أيضاً شدة التيار المتولد في سلك الوشيعة.

إذا اعتبرنا الآن الشحنات الكهربائية التي تولّد التيار في السلك، فإننا نلاحظ أن سرعتها على طول السلك عمودية على التدفق المغنطيسي وعلى سرعة السلك عندما يتحرك حاصداً خطوط القوة. وهذا يعني أن الحقل المغنطيسي يؤثر في أي شحنة متحركة بقوة عمودية على سرعتها وعلى اتجاه خطوط القوة المغنطيسية. وقد تبين أن مقدار هذه القوة يتناسب مع سرعة الشحنة مضروبة بجداء مقدار هذه الشحنة في شدة الحقل المغنطيسي. ويعرف هذا القانون باسم مكتشفه الفيزيائي الألماني العظيم هـ. أ. لورنْتز H.A.Lorentz.

وهكذا نرى أن اكتشافي أورستد وفرادي ليسا سوى وجهين لظاهرة أساسية واحدة؛ فالشحنة الكهربائية والقطب المغنطيسي لا يتأثر أي منهما بوجود الآخر طالما ظل كل منهما ساكناً بالنسبة إلى الآخر؛ أما إذا كان أحدهما متحركاً بالنسبة إلى الآخر فإنهما يتأثران بهذه الحركة النسبية لأن كلاً منهما تؤثر فيه قوة تتولد عنها (هي قوة كهربائية في حالة الشحنة ومغنطيسية في حالة القطب).

نظرية مكسويل الكهرطيسية

لقد اكتشف فرادي العديد من الظواهر الكهرطيسية الأخرى، ولكنه لم يكن يملك المهارات الرياضية لتطوير نظرية وحيدة في الحقل الكهرطيسي تشمل كل هذه الظواهر، لذلك تُركت هذه المهمة للفيزيائي البريطاني جيمس كلارك مكسويل الذي كان من الفيزيائيين البارزين. فتصنيف العلماء ولا سيما الفيزيائيين منهم، ليس سهلاً دائماً، لأن أعمالهم التي تشمل عادة مجالات متعددة لا نجد بينها عملاً ثورياً أو تحليلياً متميزاً لاكتشافات سابقة، غير أن البارزين منهم قلة، سرعان ما يظهر تفوقهم ويُعرف. من أمثال هؤلاء كان مكسويل الذي يُعد، مثل نيوتن وأينشتاين، من موحدي المبادئ العلمية، إذ رأى، وهو الرياضي الخبير، أن باستطاعته أن يوحّد الحقلين الكهربائي والمغنطيسي في حقل كهرطيسي واحد بوساطة مجموعة من المعادلات التي تربط تغيرات كلٍ من الحقلين (الكهربائي أو المغنطيسي) من نقطة إلى أخرى بتغيرات الحقل الآخر مع الزمن؛ أو بعبارة أخرى، تبيّن معادلات مكسويل أنه إذا تغير أحد الحقلين (المغنطيسي مثلاً) في نقطة معينة من لحظة إلى أخرى، فإن الحقل الآخر (أي الكهربائي في مثالنا) يتغير من نقطة إلى أخرى في الفضاء

المستطيل، فينص قانون فرادي عندئذ على أن فرق الكمون الناشيء بين طرفي السلك المتحرك يتناسب مع سرعة تغير التدفق المغنطيسي. وهذا القانون المدهش ببساطته هو الذي يُعد أساس المولدات الكهربائية التي تتألف أساساً من سلك ملتف على هيئة وشيعة كبيرة تدور في حقل مغنطيسي قوي بحيث تخترق سطح كل لفة في الوشيعة خطوطُ القوة المغنطيسية؛ فكلما ازدادت سرعة دوران الوشيعة وكان المغنطيس أقوى، ازدادت أيضاً شدة التيار المتولد في سلك الوشيعة.

إذا اعتبرنا الآن الشحنات الكهربائية التي تولِّد التيار في السلك، فإننا نلاحظ أن سرعتها على طول السلك عمودية على التدفق المغنطيسي وعلى سرعة السلك عندما يتحرك حاصداً خطوط القوة. وهذا يعني أن الحقل المغنطيسي يؤثر في أي شحنة متحركة بقوة عمودية على سرعتها وعلى اتجاه خطوط القوة المغنطيسية. وقد تبين أن مقدار هذه القوة يتناسب مع سرعة الشحنة مضروبة بجداء مقدار هذه الشحنة في شدة الحقل المغنطيسي. ويعرف هذا القانون باسم مكتشفه الفيزيائي الألماني العظيم هـ. أ. لورنْتز H.A.Lorentz.

وهكذا نرى أن اكتشافيْ أورستد وفرادي ليسا سوى وجهين لظاهرة أساسية واحدة؛ فالشحنة الكهربائية والقطب المغنطيسي لا يتأثر أي منهما بوجود الآخر طالما ظل كل منهما ساكناً بالنسبة إلى الآخر؛ أما إذا كان أحدهما متحركاً بالنسبة إلى الآخر فإنهما يتأثران بهذه الحركة النسبية لأن كلاً منهما تؤثر فيه قوة تتولد عنها (هي قوة كهربائية في حالة الشحنة ومغنطيسية في حالة القطب).

نظرية مكسويل الكهرطيسية

لقد اكتشف فرادي العديد من الظواهر الكهرطيسية الأخرى، ولكنه لم يكن يملك المهارات الرياضية لتطوير نظرية وحيدة في الحقل الكهرطيسي تشمل كل هذه الظواهر، لذلك تُركت هذه المهمة للفيزيائي البريطاني جيمس كلارك مكسويل الذي كان من الفيزيائيين البارزين. فتصنيف العلماء ولا سيما الفيزيائيين منهم، ليس سهلاً دائماً، لأن أعمالهم التي تشمل عادة مجالات متعددة لا نجد بينها عملاً ثورياً أو تحليلياً متميزاً لاكتشافات سابقة، غير أن البارزين منهم قلة، سرعان ما يظهر تفوقهم ويُعرف. من أمثال هؤلاء كان مكسويل الذي يُعد، مثل نيوتن وأينشتاين، من موحدي المبادئ العلمية، إذ رأى، وهو الرياضي الخبير، أن باستطاعته أن يوحّد الحقلين الكهربائي والمغنطيسي في حقل كهرطيسي واحد بوساطة مجموعة من المعادلات التي تربط تغيرات كلٍ من الحقلين (الكهربائي أو المغنطيسي) من نقطة إلى أخرى بتغيرات الحقل الآخر مع الزمن؛ أو بعبارة أخرى، تبيِّن معادلات مكسويل أنه إذا تغير أحد الحقلين (المغنطيسي مثلاً) في نقطة معينة من لحظة إلى أخرى، فإن الحقل الآخر (أي الكهربائي في مثالنا) يتغير من نقطة إلى أخرى في الفضاء

بطريقة معينة، والعكس بالعكس.

ولد جيمس كلارك مكسويل (1831-1879) في الملكية العائدة لأسرته في دمْفريشَر Dumfrieshire، وهو ابن محام كان يوزع وقته بين عمله في إدنْبره وهوايته في إصلاح الأجهزة الميكانيكية والمخترعات، ويبدو أن جيمس ورث عن أبيه فضوله، إذ كان يريد عادة أن يعرف ماذا يصنع هذا الجهاز الخاص أو يعمل ذاك الاختراع، غير أن نمط حياته الريفي انتهى عندما بلغ الثامنة وذلك عندما توفيت والدته، فحاول والده الاحتفاظ بأسرته كلها معاً، ولكن جيمس كان بحاجة لأن يبدأ تعليمه النظامي، لذلك أرسله والده إلى إدنبره ليعيش عند عمته، فكان يقضي أشهر الشتاء في إدنبره يدرس في أكاديميتها، وأشهر الصيف في دمفريشر. وظل على هذه الحال عشر سنوات. وكان والده يحاول أن يلبي طلباته دائماً على الرغم من أنه كان يخصص معظم وقته لإدارة ممتلكاته والاستمرار في عمله القانوني.

ولم يكن تحصيل جيمس الأكاديمي متميزاً في بادئ الأمر، ولكنه وجد عاجلاً أن لديه موهبة خاصة في الهندسة فأصبح ماهراً في هندسة الأشكال الفراغية بوجه خاص وفي الرياضيات بوجه عام، حتى أنه نال مدالية الأكاديمية السنوية للرياضيات وعمره 13 عاماً. وبدأ والده يصطحبه في العام التالي إلى لقاءات جمعية إدنبره الملكية، ويبدو أن جيمس قد استفاد من هذه الاجتماعات لأنها شجعته على اهتمامه بالأشكال البيضوية وحثته على كتابة نشرة علمية عن موضوع قُرئ في الجمعية في آذار / مارس 1846[4].

وفي عام 1847 تخرج مكسويل من الأكاديمية وكان الأول في اللغة الإنكليزية والرياضيات. وفي الخريف التالي التحق بجامعة إدنبره حيث أمضى ثلاث سنوات يشحذ فيها مهاراته في الرياضيات والفيزياء، وكان يقوم في أثناء أشهر الصيف في ملكية الأسرة بتجارب في مختبر منزليّ جهزه بنفسه. كما كان لديه الوقت ليؤلف مزيداً من النشرات عن المنحنيات الدحروجية وعن توازن الأجسام المرنة، وقد قرئت هذه النشرات في الجمعية في عامي 1849 و1850 على التوالي[4].

وفي عام 1850 التحق مكْسويل بكلية بيتَر هوْس في كمبردج، ولكنه سرعان ما تحول عنها إلى كلية ترينيتي، إذ اعتقد أنه سيكون هناك أوفر حظاً في اكتساب عضوية الجامعة. وقد ظهرت ألمعيته في عمله الجامعي باكراً وتعرَّفها موجهه في كمبردج الأستاذ البارز هوبْكنْز Hopkins، الذي كان يعتقد أن مكسويل سيصبح أعظم رجل قابله في حياته[4]. وهكذا انتُخب مكسويل باحثاً في كلية ترينيتي في نهاية سنته الثانية فيها.

وفي حزيران / يونيو 1853 عانى مكسويل من انهيار عصبي حينما كان يحضّر لفحص التريبوس Tripos المجهِد (وهو امتحان خاص لنيل أعلى درجة شرف في الرياضيات في كمبردج). وحين تقدم للفحص في كانون الثاني / يناير 1854 كان لا يزال يعاني من آثار مرضه، فنجح الثاني بعد



جيمس كلارك مكسويل (1831-1879)

إ. روث E.Routh الذي أصبح بعد ذلك رياضياً متميزاً، ومع ذلك تعادل الإثنان على المركز الأول في المسابقة الأكثر تقدماً لنيل جائزة سميث[5]. وكان مكسويل قد وجد أن المحيط الجامعي يتلاءم بصورة مناسبة مع مزاجه الشخصي الخاص إلى حدٍ ما، لذلك تابع دراساته في كمبردج بعد أن نال درجته الدراسية في الجامعة؛ ثم انتُخب عضواً في هيئة التدريس في كلية ترينيتي وعمره 24 سنة، فبدأ يلقي محاضرات ويشرف على تجارب في الكهرباء والمغنطيسية لكونها جزءاً من عمله. ولكنه سرعان ما غادر كمبردج ليتسلم كرسي الفلسفة الطبيعية في كلية ماريشال في أبرْدين Aberdeen.

وفي عام 1857 تقدم مكسويل بنشرة علمية عن بنية حلقات زحل ففازت بجائزة آدامز لبرهانها على أن بنية هذه الحلقات لا يمكن أن تكون مستقرة إلا إذا كانت مؤلفة من جسيمات دقيقة[6]. ولم تؤد هذه النشرة إلى توطيد شهرة مكسويل فحسب بل زادت أيضاً من اهتمامه بحركات المجموعات الضخمة من الجسيمات الذي كان أساس عنايته بالنظرية الحركية في الغازات، «فسرعان ما أدى هذا الاهتمام إلى استنتاجه الرائع لتوزع سرع جزيئات غاز في حالة توازن عند أي درجة حرارة، فكانت هذه الخطوط المتقدمة الجبارة في فهم سلوك الجسيمات الأولية للغازات تمثل إحدى الخطوط الرئيسية في تقدم النظرية الذرية في المادة»[6]. وقد نشر مكسويل هذه النتائج في عام 1860،

أي في العام نفسه الذي ضُمت فيه كلية ماريشال إلى جامعة أبردين، فألغى هذا الاندماج مركزه الوظيفي، ولكنه التحق حالاً بكلية الملك في لندن حيث أمضى السنوات الخمس التي تلت ذلك، في صياغة نظريته في الحقل الكهرطيسي، كما أنجز في الوقت نفسه العديد من التجارب في منزله حيث كانت زوجته التي تزوجها في عام 1858 تقوم بدور المساعد القدير. وكان يلقي أيضاً عدداً من المحاضرات في موضوعات علمية ويعمل على تحسين كتبه في الكهرباء والمغنطيسية والحرارة.

وفي عام 1865 تخلى مكسويل عن مركزه والتحق بهيئة التدريس في كمبردج حيث عمل فاحصاً في امتحانات التريبوس في الرياضيات، فكانت أسئلته في الترموديناميك والكهرباء والمغنطيسية حافزاً على تأليف لجنة جامعية لكي توصي بإعادة النظر في المنهاج الدراسي؛ فخلصت الجمعية إلى ضرورة إعطاء مقررات في هذه الموضوعات وتأسيس مختبر للفيزياء لإجراء التجارب فيه. وكان من الممكن ألا تُنفّذ هذه التوصيات أبداً بسبب الحاجة إلى اعتماد مالي لولا ما أسهم به من مال إسهاماً سخياً رئيس الجامعة الدوق ديفُنْشَر Devonshire الذي كان ثرياً ذا ثروة خاصة به وله مؤهلات أكاديمية بارزة بحكم حقه الشخصي إذ أنه مُنح لقب المجادل الماهر Wrangler الثاني (والمجادل الماهر هو الذي يفوز بأعلى درجة شرف في فحص التريبوس للرياضيات في كمبردج)، كما فاز بالمركز الأول في مسابقة جائزة سميث[7]. وقد قدم الدوق في عام 1870 الرصيد المطلوب لبناء المختبر وتجهيزه، وهو الذي سُمّي بعدئذ باسم هنري كافِنْدش، وأصبح هذا المختبر ولا يزال موطن الكثير من الأعمال القيّمة في ميدان الفيزياء الذرية في بريطانيا العظمى.

وكان بناء المختبر بحاجة إلى توجيهات أستاذ حسن الاطلاع على موضوعات الكهرباء والمغنطيسية والترموديناميك، فعُرض هذا المنصب على مكسويل بعد أن رفضه اللورد كلْفن Kelvin. وفي خريف 1871 استلم مكسويل واجباته الرسمية فيه. ولكن ما يُؤسَف له أنه قبل أيضاً مهمة شاقة هي أن يدقق المخطوطات غير المنشورة التي خلّفها كافندش الذي كانت له صلة قرابة بعيدة مع الدوق، وأن ينشرها ويوزعها فشغلت هذه المهمة معظم السنوات الخمس التالية، وكانت تستهلك فيما عدا واجباته الرسمية معظم ساعات عمله[8]. كما أصاب المرض زوجته التي ظلت طريحة الفراش عدة أشهر، فكان مكسويل يخصص معظم وقته الفائض للعناية بها. وهكذا أخذ التوتر المستمر منه مأخذاً فبدأ في عام 1877 يشكو من ألم في معدته، وظل يتألم بصمت مدة سنتين إلى أن استشار في النهاية طبيباً في بداية عام 1879، وراح يذبل تدريجياً طيلة الصيف إلى أن استسلم أخيراً للموت ضحية سرطان المعدة وهو لا يزال شاباً نسبياً في الثامنة والأربعين يوم 5 تشرين الثاني / نوفمبر من عام 1879.

ولكي نرى كيف أنجز مكسويل الجمع بين الكهرباء والمغنطيسية دعونا نتأمل في الحقل الكهربائي المقترن بمكثفة كهربائية تتألف من صفيحتين معدنيتين متوازيتين تفصل بينهما مسافة

صغيرة وإحداهما موصولة بالأرض، فإذا شحنت إحدى الصفيحتين بشحنة كهربائية سالبة اكتسبت الأخرى حالاً شحنة موجبة تساويها ونشأ بين الصفيحتين حقل كهربائي له خطوط قوة عمودية عليهما. وقد درس مكسويل هذا الجهاز البسيط بكل عناية واهتم بوجه خاص بما يحدث بين الصفيحتين وقد أثارت هذه التغيرات اهتمام مكسويل إثارة شديدة، إذ تبين أنه إذا لم تُفسر تفسيراً مناسباً فإنه يبدو أنها ستُدخل انقطاعاً في سلوك حقل المكثفة الكهرطيسي.

ولكي تفهم هذه التغيرات يجب أن نلاحظ أنه عندما يجري التيار الكهربائي في السلك الناقل بين الصفيحتين تتولد خطوط قوة مغنطيسية دائرِية تحيط به وتتزايد شدتها من الصفر إلى نهاية عظمى عندما تكون الشحنة السالبة قد انتقلت بكاملها في الناقل إلى الصفيحة الأخرى، وتكون قد زالت تماماً من الصفيحة الأولى، وبعد ذلك لا يجري في الناقل أي تيار وتصبح صفيحتا المكثفة غير مشحونتين فيزول الحقل الكهربائي بينهما. ولكن الحقل المغنطيسي الذي ولّده التيار والمحيط بالناقل يظل موجوداً، فهذا الوضع كان يفتقر في نظر مكسويل إلى التناظر الذي ثبت باكتشافيْ أورستد وفرادي، أضف إلى ذلك أن الفرق بين ظروف الفضاء المحيط بالناقل (حقل مغنطيسي) وظروف فضاء المكثفة (عند انعدام حقلها الكهربائي) يُمثّل انقطاعاً لا يمكن التغاضي عنه. وقد اقترح مكسويل، لكي يزيل هذه الصورة غير المقبولة ويحقق توحيد الحقلين الذي كان يرغب فيه، فكرة أنَّ تناقص الحقل الكهربائي بين صفيحتيْ المكثفة المصاحب للتيار الذي كان يتعاظم في الناقل هو نفسه تيار ولكنه لا يجري في الناقل بل في الخلاء. وقد سمي هذا التيار «تيار الانتقال Displacement Current» مظهراً عن حق أن جريانه يولد حقلاً مغناطيسياً له خطوط قوة تحيط بخطوط قوة الحقل الكهربائي.

ولكن هذا الوضع الذي آلت إليه المكثفة والناقل عندما زالت الشحنات من صفيحتي المكثفة وانعدام التيار في الناقل كان غريباً جداً لم يسبق التفكير فيه من قبل أبداً، إذ كيف يوجد حقل مغنطيسي في فضاء خالٍ وله خطوط قوة تحيط بسلك لا يجري فيه تيار، أو تحيط بفضاء خالٍ بين صفيحتي المكثفة بعد زوال شحنتيهما؟ تُرى ما الذي حدث بعد هذا الزوال؟ إن خطوط القوة المغنطيسية بدأت بالتلاشي بعد أن لم يعد ثمة تيار يدعمها وأخذت تتقلص كأنها شرائط مطاطية مقتربة ثانية من الناقل وداخل المكثفة. ولكن اكتشاف فرادي يثبت أن مثل هذه الحقول المغنطيسية المتلاشيَة تولّد حقولاً كهربائية تسبّب حركة شحنات كهربائية في الناقل؛ إذاً فثمة تيار يتولد ثانية في الناقل ولكنه تيار يجري في الاتجاه المعاكس للتيار الأولي، ومن ثم تنشحن صفيحتا المكثفة من جديد ولكن مع تعاكس القطبين. وهكذا تتكرر الظاهرة نفسها مرة تلو الأخرى بصورة دورية ليتكون لدينا هزاز كهرطيسي شبيه بهزاز ميكانيكي (نواس أو نابض).

ولكي نرى مبلغ التشابه بين الهزازين الكهرطيسي والميكانيكي دعونا ننظر في هذا التشابه من

وجهة نظر مغايرة بعض الشيء آخذين في الحسبان الطاقة الكهرطيسية للمكثفة المهتزة. فعندما لم تكن هذه المكثفة مفرَّغة (ولا وجود لتيار في الناقل)، كانت طاقتها كلها في الحقل الكهربائي بين صفيحتيها، أي الطاقة الكامنة لشحنات الصفيحتين؛ فالطاقة كلها كانت إذاً طاقة كامنة كما هو الأمر في النواس عندما ترفع كريته إلى فوق وضع توازنها (أي فوق أخفض نقطة تصلها في اهتزازها). وكما تتحول الطاقة الكامنة في النواس إلى طاقة حركية، تتحول كذلك الطاقة الكامنة في المكثفة إلى طاقة التيار الحركية، فتُختزن هذه الطاقة الحركية في الحقل المغنطيسي المتولد من التيار وتصبح هذه الطاقة من جديد طاقة كامنة لصفيحتي المكثفة مع انعكاس اشارتي القطبين فيهما. لنتوسع الآن قليلاً في هذا التشابه ولنلاحظ أن كرية النواس لا تتوقف عن اهتزازها عند أخفض نقطة بل تستمر في حركتها بسبب عطالتها لتصل إلى الجانب الآخر من الاهتزاز. وهذا أيضاً ما يصدق على التيار في دارة المكثفة، إذ تدعو عطالة الشحنات المتحركة التي تولد التيار إلى أن تواصل هذه الشحنات حركتها حتى تنشحن المكثفة ثانية بشحنات متعاكسة على الصفيحتين؛ وما أن تكتمل دورة إحدى الهزات إلا وتكون دورة أخرى مهيّأة لتبدأ الاهتزاز.

وهنا يبرز سؤال مهم هو: ما سرعة حدوث هذه الاهتزازات؟ (أو ما عدد الاهتزازات في الثانية؟ أي تواترها؛ أو ما مدة الهزة الواحدة، أي دورها الذي هو مقلوب تواترها؟). وللجواب عن هذا السؤال نلجأ أيضاً إلى التشابه مع النواس الذي يتعين دوره بطوله وبتسارع الثقالة، فكلما زاد طوله بطؤت هزاته، وكلما ازداد تسارع الثقالة أسرعت هزاته. وهذه القاعدة تسري أيضاً، بوجه عام، على المكثفة؛ فكلما صغر مقدارها أسرعت هزاتها، وكلما ازداد الحقل المغنطيسي الذي يولده تيارها بطؤت هزاتها، أي أن الحقل المغنطيسي الذاتي الذي يولده التيار بعمل عمل المعيق أو المبطىء للاهتزازات. ويؤدي التحليل الدقيق لتفريغ المكثفة إلى صيغة بسيطة ذات أهمية عملية كبيرة تعطي دور هذه الاهتزازات.

وقبل أن نعود إلى نظرية مكسويل الكهرطيسية، نشير إلى خاصة مهمة في اهتزازات المكثفة الكهربائية تظهر جوهر نظرية مكسويل (أعني اكتشافه طبيعة الحقل الكهرطيسي الموجية). فاهتزازات المكثفة الكهربائية لا تستمر إلى الأبد بل تتوقف بعد مدة من الزمن؛ وهذا يعني أن المكثفة فقدت طاقتها كلها مثلما يحدث في النواس. غير أن ثمة فرقاً مهماً يميز هاتين الخسارتين للطاقة، فالنواس يخسر طاقته كلها بسبب الاحتكاك على صورة حرارة، في حين يختلف الأمر في المكثفة، فحتى لو أضعف الاحتكاك فيها إلى الصفر عند التفريغ فإنها تفقد كامل طاقتها الكهربائية بسرعة لأنها تشعها إلى الفضاء. ولكي ندرك طبيعة هذه الظاهرة فيزيائياً، دعونا ننظر ثانية في تيار الانتقال المتولد من تغير الحقل الكهربائي بين صفيحتي المكثفة مع ملاحظة أن هذا التيار محاط بحقل مغنطيسي متغير يرتبط بدوره بتغير حقل كهربائي (ناشىء عن التحريض)، وهكذا دواليك، فتتولد سلسلة متناوبة من الحقلين الكهربائي والمغنطيسي؛ وفي كل دورة جديدة تدفع السلسلة

الجديدة بالسلسلة القديمة إلى الفضاء. فثمة إذاً سلسلة مهتزة من الحقلين الكهربائي والمغنطيسي تندفع إلى الفضاء بصورة موجات.

نظرية مكسويل الكهرطيسية في الضوء

إن هذا الوصف الفيزيائي الفج للإشعاع الصادر عن مكثفة مهتزة لا يعبّر إلا تعبيراً سطحياً عن سياق نظرية مكسويل الكهرطيسية، ولكنه يكفي لإظهار أن النظرية تتنبأ بوجود أمواج كهرطيسية يمكن أن تُستنتج استنتاجاً دقيقاً من معادلات مكسويل الست للحقل الكهرطيسي، إذ تصف ثلاث من هذه المعادلات كيف تتعين تغيرات الحقل المغنطيسي من نقطة إلى أخرى بتغيرات مركبات الحقل الكهربائي المكانية الثلاث مع الزمن، كما تصف المعادلات الثلاث الأخرى كيف تتعين تغيرات الحقل الكهربائي من نقطة إلى أخرى بتغيرات مركبات الحقل المغنطيسي المكانية الثلاث مع الزمن. وقد توصل مكسويل بطريقة رياضية من معادلات الحقل الكهرطيسي التي تمزج مركبات الحقلين الكهربائي والمغنطيسي إلى معادلة بسيطة لمركبات الحقل الكهربائي وإلى معادلة مشابهة لمركبات الحقل المغنطيسي. وتدعى هاتان المعادلتان «المعادلتين الموجيتين» لأنهما تظهران أن الحقل الكهربائي والحقل المغنطيسي ينتشران معاً بصورة اهتزازات دورية، وكل منهما عمودي على الآخر، وكلاهما عموديان على منحى انتشار الموجتين. أضف إلى ذلك أن اهتزازات الحقلين الكهربائي والمغنطيسي ليست متفقة في الطور، بل إن بينهما فرقاً في الطور مقداره 90° (أو ربع دورة) بمعنى أنه حين يكون الحقل الكهربائي في نهايته العظمى يكون الحقل المغنطيسي صفراً، والعكس بالعكس. ويدعى هذا النمط من الأمواج «أمواج عرضانية» تشبيها لها بانتشار الاضطراب الدوري على سطح الماء حين تلقى فيه حصاة، إذ نلاحظ أن اهتزازات سطح الماء عمودية على منحى انتشار الأمواج المائية.

ولم تتضح أهمية نظرية مكسويل الكهرطيسية بكل أبعادها إلا حين تبيَّن أن سرعة انتقال الأمواج الكهرطيسية هي سرعة الضوء نفسها؛ إذ تربط المعادلة الموجية تغيرات سعة الحقل (أو شدته) المكانية (في المكان) بتغيراته الزمنية (مع الزمن). وتغيرات الحقل المكانية هنا هي أساسياً سعة الموجة مقسومة على مربع مسافة صغيرة، وتغيرات الحقل الزمنية هي السعة نفسها مقسومة على مربع زمن قصير (نوع من التسارع). ولكن لا يمكن لهذين التغيرين أن يكونا حدين في معادلة واحدة دون أن يكون ثمة معامل إضافي يرتبط بهذا الحد أو ذاك لكي يجعل الأبعاد المكانية الزمانية للحدين هي نفسها لأن أبعاد الحدّين في الأصل مختلفة، ففي مقام الحد الأول يوجد مربع طول أما الحد الثاني ففي مقامه مربع زمن، ومن ثم يجب أن يكون في المقام الثاني معامل هو مربع سرعة. إن هذه السرعة بالتحديد هي سرعة الموجة وقيمتها العددية، كما أثبت مكسويل، هي سرعة

الضوء. وهذا يؤكد بوضوح صحة النظرية الكهرطيسية في الضوء، بل يؤكد صحة هذه النظرية في حالة كل إشعاع، فمكسويل إذاً لم يوحّد الكهرباء والمغنطيسية فحسب بل وحّد معهما الضوء في نظرية واحدة. وهكذا غدت هذه النظريةُ بعد ذلك النظرية الكهرطيسية في الإشعاع، وهي تشمل جميع إشعاعات الطيف الكهرطيسسية بدءاً من أمواج الراديو الطويلة حتى أقصر الإشعاعات (غاما γ) التي تصدرها نوى الذرات.

إن وجود سرعة الضوء في معادلات مكسويل لافت للنظر حقاً، لأن قيمتها في هذه المعادلات لا علاقة لها بمرجع الراصد وإنما ظهرت على صورة نسبة بين مجموعتين من الوحدات (الكهراكدية والكهرطيسية) اللتين يمكن أن يُعبَّر فيهما عن الشحنة الكهربائية. وهذا الاستقلال أمر غريب لأن سرعة أي شيء نراقبه تتوقف في الميكانيك النيوتني على حركة الراصد (أو بالأحرى تنسب إليه)، لذلك ترتَّب على هذه الخاصة الغريبة لسرعة الضوء (أو استقلاله عن حركة الراصد) أمور كثيرة كان أول من أعطى مدلولها ونتائجها هو أينشتاين في نظريته النسبوية الخاصة. وثمة خاصة أخرى جديرة بالملاحظة في سرعة أمواج مكسويل الكهرطيسية هي أنها واحدة لكل الأطوال الموجية في الخلاء، في حين أنها تتغير من طول موجة إلى آخر في وسط مادي. ففي وسط كهذا تصبح سرعة الضوء، كما تثبت نظرية مكسويل، مساوية لسرعته في الخلاء (أو سرعته القصوى) مقسومة على قرينة انكسار هذا الوسط (وهي أكبر من 1 دائماً) إذا كان غير مغنطيسي. ولما كانت قرينة انكسار الوسط الكثيف كالزجاج تزداد كلما نقص طول موجة الضوء فهي في حالة الأمواج القصيرة (الأزرق والبنفسجي) أكبر منها في حالة الأمواج الطويلة (الأحمر والبرتقالي)؛ أي أن الضوء الأحمر في الوسط الكثيف أسرع من الضوء البنفسجي، أو أن مسار الأشعة الحمراء عند مرور الضوء من الخلاء إلى الوسط في اتجاه مائل على سطحه أقل انعطافاً عن هذا السطح من مسار الأشعة البنفسجية؛ وهذه العلاقة سبق أن اكتشفها فيزيائيون تجريبيون قبل أن يعلن مكسويل نظريته الكهرطيسية في الضوء، لذلك كان الفيزيائيون في عصره مهيؤون بوجه عام للتسليم بها ولكن مع شيء من التحفظ. غير أن التحفظات التي اتُّخذت بشأن صحتها قضت عليها كلها تجارُب هنري رودلف هرْتز عندما ولَّد الأمواج الكهرطيسية بهزاز كهربائي واستقبلها بهزاز من النوع نفسه وضعه على أبعاد مختلفة من مصدر الأمواج. وقد ولَّد هرتز أمواجه بتفريغ مكثفة كانت تضم، بدلاً من الصفيحتين كرتيْن صغيرتين تفصل بينهما مسافة قصيرة، فعندما زاد فرق الكمون بين الكرتين إلى درجة عالية كافية حدث التفريغ على صورة شرارة تولَّدت عنها اهتزازات كهرطيسية سريعة جداً. وقد سبَّبت هذه الأمواج التي تولدت بهذه الطريقة حدوث شرارة اندلعت بين كرتين صغيرتين مماثلتين للسابقتين يصل بينهما ناقل مماثل وموضوعتين على بعد عدة ياردات من مجموعة الكرتين الأوليين. وهكذا أثبت هرتز أن أمواج مكسويل الكهرطيسية يمكن توليدها فعلاً وأنها تنتشر بالسرعة نفسها التي تتنبأ بها تماماً معادلات مكسويل، فكان هذا الاكتشاف فاتحة تقانة الراديو.

وقد ذهب هرتز إلى أبعد من مجرد البرهان على أن الأمواج الكهرطيسية تتولد من هزاز كهرطيسي (تفريغ مكثفة) ، فقد برهن على أنها تنعكس وتنكسر وتنعرج (أو تنعطف عند الحوافي) شأنها شأن الضوء تماماً ، فبدد بذلك كل شك حول نظرية مكسويل الكهرطيسية في الضوء ؛ كما دعم ، بإثباته نظرية مكسويل ، الاعتقادَ بأن المادة تتألف من جسيمات مشحونة كهربائياً ، لأن الضوء ينطلق من الأجسام الحارة سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية ، وهذا لا يمكن أن يعني إلا أن الشحنات الكهربائية داخل المادة تكون في حالة اهتزاز عندما تُصدر الضوء مما يدعم أيضاً ظنون فرادي عن طبيعة المادة الكهربائية .

وقد أغنت تجارب الفيزيائي الألماني ب . زِيمن P.Zeeman وضوح العلاقة بين الضوء والكهرطيسية بأن أثبت أن أطوال موجات الضوء المختلفة المنطلقة من غاز متوهج تتغير عندما يوضع الغاز في حقل مغنطيسي قوي . كما اكتشف هرتز مفعولاً مهماً آخر يدل على البنية الكهربائية للمادة ، وهو أنه عندما تُثار إحدى الكرتين الصغيرتين في الهزازة الكهربائية بحزمة ضوئية ، فإن التفريغ يحدث بسرعة أكبر مما لو لم يسقط الضوء عليها . والسبب في ذلك هو أن الضوء يصطدم بالشحنات الكهربائية (الإلكترونات) في الكرة المُنارة فيحركها فتقوم بدور النواقل للشرارة الكهربائية بين الكرتين . وقد أصبحت هذه الظاهرة تعرف فيما بعد بالمفعول الكهرضوئي . وعجزت النظرية الموجية في الضوء عن تفسير كل ملابساتها ، لذلك ظلّت سراً من أسرار الفيزياء إلى أن استطاع أينشتاين تفسيرها بمفهومه عن فوتونات الضوء الذي بناه مباشرة على نظرية بلانك الكمومية .

وسنرى في الفصل القادم أن مكسويل أسهم أيضاً بالنظرية الجزيئية في المادة وأنه قام بدور مهم في تطوير الفيزياء الإحصائية (الميكانيك الإحصائي) ولكن موته المبكر أوقف سير إبداعه العلمي ، ومع ذلك يمكن أن نطلق بحق على السنوات الأربعين الأخيرة من القرن التاسع عشر اسم سنوات مكسويل على الرغم من حياته القصيرة .

أوسع قوانين الفيزياء
الترموديناميك والنظرية الحركية والميكانيك الإحصائي

«إن أهم اكتشافات قوانين الطبيعة وأساليبها وتطوراتها انبثقت دائماً تقريباً من تفحص أصغر الأشياء التي تتضمنها».
ـ جان بابتيسْت دي لامارك*

يحفل تاريخ الفيزياء بأمثلة عديدة عن تطورات سارت في بادئ الأمر منعزلة بعضاً عن بعض، ثم تبين بعد ذلك أنها مترابطة ترابطاً شديداً. وهذا ما ينطبق بوجه خاص، كما يتضح بسهولة، على الصياغة الرياضية لنظريات عديدة. فالمعادلة الموجية مثلاً، أي المعادلة التفاضلية ذات المشتقات الجزئية التي تصف انتشار الموجة، كانت قد وضعت في البدء للأمواج الصوتية. ثم نُقلت جملةً وتفصيلاً، إذا جاز هذا القول، إلى وصف الأمواج الكهرطيسية، أي إلى وصف انتشار الإشعاع. كما طبقت نظرية الكمون التي وضعت في البدء لتسهيل مسائل الثقالة على الكهرباء الراكدة والمغنطيسية الراكدة دون تغيير. ثم استخدم إ. شرودنْغَر بعد مدة المعادلة الموجية التقليدية نفسها لوصف خواص حركة الإلكترون الموجية. وهناك مثال آخر مهم جداً هو أن الرياضيات التي تصف نماذج تداخل أمواج الضوء وانعراجها عند مرورها عبر سلسلة من الشقوق الضيقة في حاجز، طُبقت بنجاح لوصف توزع نموذج انعراج الإلكترون عند مروره عبر شقوق كهذه. ولكن هذه النظم الرياضية المتماثلة التي يمكن استخدامها لوصف ظواهر تبدو غير مترابطة، لا يعني تماثُلها هذا، بوجه عام، أن هذه الظواهر هي مجرد مظاهر مختلفة لواقع أساسي واحد. ومع ذلك ثمة شعور قوي بأن علاقات متماثلة كهذه بين رياضيات هذه الظواهر المختلفة لا بد أنها تشير إلى وحدة الحقائق

* Jean Bahtiste de Lamarck (1744-1829) عالم طبيعي فرنسي عرض نظرية في التطور تقول بأن الكائن العضوي يمر بصفات تناسلية متطورة استجابة للحاجة التي تخلقها بيئته.

الفيزيائية الكامنة خلفها .

وكما أنه لا يترتب على تشابه الصيغ الرياضية وجود وحدة فيزيائية ، فكذلك لا يعني اختلاف التمثيلات الرياضية اختلاف الظواهر الفيزيائية ، فالمعالجة الرياضية يمكن في الحقيقة أن تحجب أحياناً الوحدة الفيزيائية الكامنة خلف الظواهر ، وهو ما يُرى بوضوح في فروع الفيزياء الثلاثة التي تدعى الترموديناميك والنظرية الحركية والميكانيك الإحصائي ، فهي تظهر بمظاهر رياضية مختلفة مع أنها تصف في الأساس الظاهرة الفيزيائية نفسها . ولقد شُد الفيزيائيون دائماً إلى هذه الفروع وأولوها عناية فائقة ، لأنها تعتمد على الحد الأدنى من الفروض وتسود فيها أعم المبادئ المعروفة في الفيزياء ، كما أنه يمكن حل جميع المسائل الواقعة في نطاقها . وسندرس في هذا الفصل تطور هذه الفروع الفيزيائية من وجهة نظر تقليدية (أي نيوتنية) ، ولكننا سنرى فيما بعد كيف بدَّلت نظرية الكم والنظرية النسبية هذه الفروع وإلى أي مدى فعلت ذلك ، كما سنرى ، بوجه خاص ، أن الميكانيك الإحصائي التقليدي البسيط قد حل محله نوعان مختلفان من الميكانيك الإحصائي بسبب نظرية الكم وأن فرعاً جديداً من الترموديناميك هو ترموديناميك الثقوب السوداء فرضته على الفيزيائيين نظرية النسبية العامة . ولكن المبادئ العامة في الترموديناميك والنظرية الحركية والميكانيك الإحصائي ظلت على حالها لم تتبدل منذ نشوئها وحتى الوقت الراهن .

الترموديناميك

لقد بدأ الترموديناميك ، كما نعلم اليوم ، مع ي . ر . فون ماير J.R.Von Mayer حين اكتشف في عام 1842 تكافؤ الحرارة مع الطاقة الميكانيكية (أي مع العمل أو الطاقة الحركية أو الطاقة الكامنة) ، ثم نص على ما يعرف اليوم بقانون الترموديناميك الأول (أو مبدأ انحفاظ الطاقة بما فيها الحرارة بوصفها نوعاً من أنواع الطاقة) . وكان ماير (1814-1878) قد صمم ، وهو ابن صيدلاني في هيلبرون Heilbronn في ألمانيا ، ألا يحذو حذو أخويه الأكبر منه ويمتهن مهنة الأسرة ، فالتحق بدلاً من ذلك في عام 1832 بجامعة توبنغن Tübingen لدراسة الطب ، إلا أنه أوقف وطرد في عام 1837 لنشاطه في الجمعية الطلابية السرِّية . وعلى الرغم من ذلك ، عاد في السنة التالية لإنهاء دراساته والنجاح في الامتحان الطبي الرسمي . وأمضى بعد ذلك سنة يعمل طبيباً على متن مركب تجاري ألماني كان مبحراً إلى جزر الهند الشرقية ، فبدأ هناك بصياغة نظريته القائلة بأن الحرارة والحركة هما مظهران لكيان واحد في الطبيعة ، ويمكن أن يتحول أحدهما إلى الآخر ، ويظل هذا الكيان (الطاقة) منحفظاً في أي تحول كهذا[1] . وكان الباعث الذي دفع ماير إلى هذا التفكير هو احمرار الدم المدهش عند البحارة الجدد الذين قام بفحصهم ، إذ فكر بأن هذا الاحمرار ناشيء عن حرارة الإقليم الاستوائي ، لأن معدل الاستقلاب (الأيض) المنخفض يساعد على إبقاء درجة حرارة الجسم

على حالها في الطقس الحار، مما يعني أن كمية الأكسجين التي يجب أخذها من الدم الشرياني الأحمر هي أقل. وكان ماير يرى أن أكسدة الطعام هي المصدر الممكن الوحيد لحرارة الحيوان، فاستنتج من ذلك أنه يمكن تقدير كمية الطاقة الكيمياوية الكامنة في الطعام من أنها هي كمية الحرارة الناتجة عن أكسدة هذا الطعام[1]. كما اعتقد بأن قوة العضلة وحرارة الجسم تُستمدان من الطاقة الكيمياوية الكامنة في الطعام، وأنه إذا كان تزود الحيوان من الطاقة وصرفه لها متعادلين، فلا بد أن يكون ثمة انحفاظ للطاقة[1]. وفي عام 1845 صدرت نشرة علمية لماير عممت هذا المبدأ (مبدأ الانحفاظ) إلى الطاقة المغنطيسية والكهربائية والكيمياوية فوصف تحول الطاقة الأساسي في العالم الحي بأنه يبدأ من تحويل النباتات طاقة الشمس إلى طاقة كيمياوية كامنة ثم يليه استهلاك الحيوانات لمصدر هذه الطاقة (بصورة طعام) فتحول الحيوانات بعدئذ هذه الطاقة إلى حرارة جسمانية وإلى طاقة عضلية ميكانيكية في عملياتها الحياتية[2].



يوليوس روبرت فون ماير (1814-1878)

غير أن هذه الأفكار ، على الرغم من أصالتها ، لم تلق قبولاً مُرضياً لدى جمعية الفيزيائيين ، فشعر ماير بالخيبة والكآبة ، وضاعف هذا الشعورَ نفورُه الدائم من أخيه فرتْز Fritz بسبب اختلاف مواقفهما السياسية من ثورة عام 1848 وموتُ خمسة من أبنائه السبعة وهم أطفال ، فحاول في عام 1850 الانتحار ، ثم عانى على مدى الأعوام القليلة التالية من نوبات خبَل أُدخل بسببها إلى عدد من المشافي الواحد تلو الآخر .

على أن الفيزيائي الألماني هـ . هلمهولتز H.Helmholtz ، الذي قرأ بعض نشرات ماير الأولى ، بدأ يشيد بأهمية عمله ويدافع عن أسبقيته في اكتشاف مبدأ انحفاظ الطاقة . كذلك ، تبنى قضيته ر . كلوزيوس ثم من بعده الفيزيائي الإنكليزي ج . تِندال J.Tindall . ويبدو أن هذا الاعتراف العلمي المتأخر جداً كان له أثر علاجي كبير وسريع على صحة ماير المنسي لمدة طويلة ، فبدأ باتصالات واسعة مع مؤيديه ثم رأى أخيراً العديد من نشراته المبكرة تُترجم إلى اللغة الإنكليزية . وفي عام 1870 انتُخب ماير عضواً مراسلاً لأكاديمية العلوم الفرنسية . وفي السنة التالية منحته الجمعية الملكية مدالية كوبلي Copley.ومهما يكن من أمر هذا الوضع الجديد الذي صار إليه ماير ، فقد كان قَدَره ألا يكون لأعماله إلا أثر ضئيل مباشر في العلم ، لأنها كانت قد أصبحت في غضون ذلك معروفة على نطاق واسع في الدوائر العلمية ، إذ إن مبادئها كانت مصاغة سابقاً بمعزل عن أعماله ورسخت في الفيزياء . أضف إلى ذلك أن ماير لم يكن يستخدم الرياضيات كثيراً ، فحد ذلك من فائدة نشراته للفيزيائيين الآخرين . والحقيقة أن العمل التجريبي الدقيق الذي يحدد المكافىء الميكانيكي للحرارة يعود الفضل فيه إلى العالم البريطاني الهاوي ج . ب . جول J.P.Joule ، إذ أظهرت قياساته الدقيقة أن كمية الحرارة المتولدة من كمية عمل معينة (على صورة احتكاك مثلاً) هي نفسها دائماً ، وهذا هو ما جعل الاعتراف بعبقرية ماير أمراً ممكناً .

لم تكن صياغة ماير لقانون الترموديناميك الأول سوى الخطوة الأولى في تطور هذا العلم ، أما الخطوة الثانية المتعلقة بمردود الآلات الحرارية فقد قام بها المهندس الفرنسي ن . ل . سادي كارنو N.L.Sadi Carnot الذي اكتشف الدورة التي تدعى الآن باسمه ، وأرسى بذلك أسس قانون الترموديناميك الثاني.وكان كارنو (1796-1832) الابن البكر للازار كارنو الذي كان مهندساً بارزاً حقق عدداً من الإنجازات القيمة في الميكانيك الهندسي ، فكان سادي أول معلم لابنه وهو يافع ، ورسَّخ عنده اهتمامات متعددة المجالات في الرياضيات والعلوم . ثم غادر سادي منزله لدراسة الكيمياء والهندسة والميكانيك في مدرسة البوليتكنيك (المتعددة التقانات) . وقد انقطعت دراسته هذه بضعة أشهر بسبب تجنيده في جيش نابليون ، فشاهد في أثناء ذلك العمليات المضادة لاجتياح الحلفاء عند ضاحية فنْسين Vincennes قبل أن يعود إلى مدرسته ويتخرج منها في عام 1814 . ثم أمضى سنتين وهو يدرس في مدرسة الهندسة قبل أن يُقلَّد رتبة ملازم ثانٍ في فوج الهندسة . وكانت الأعمال الورقية

المكتبية (الروتينية) تستنفد معظم وقته، ولكنه نُقل أخيراً إلى مركز في أركان الجيش حيث أصبح حراً في مواصلة اهتماماته العلمية، فتابع دراسة مقررات هندسية مختلفة في معاهد باريس بما فيها السوربون، وبدأ بتفحص الآلات البخارية تفحصاً انتقادياً. وفي عام 1823 شرع كارنو يعمل في كتابه الذي أوجز فيه أفكاره عما يمكن إجراؤه من تحسينات على مردود الآلات البخارية، وعنوانه «تأملات في قوة النار المحرّكة وفي الآلات المختصة بتطوير هذه القوة».

وعلى الرغم من أن الكتاب استُقبل عند نشره في العام التالي 1824 بتعليقات إطرائية مؤيدة، فقد ظل معظم العلماء غير آبهين كثيراً لإسهام كارنو في دراسة الحرارة. وقد أوجز كارنو في هذا الكتاب ثلاث أوليات جعلت المعايير العامة التي يتم التحكم بها على مردود الآلة البخارية الفعال مبنية على أسس العلم المسلَّم بها: فأكد أولاً أن الحركة الدائمة مستحيلة مع أنها كانت ترد في دراسة الميكانيك بما فيها بعض الدراسات التي قام بها والده[3]، وثانيها: استخدام نظرية السيالة الحرارية لكي يؤكد أنه يمكن قياس كمية الحرارة التي تمتصها جملة فيزيائية أو تصدرها بتفحص حالتيْ الجملة الابتدائية والنهائية، وثالثها: افتراضه أنه يمكن توليد عمل مفيد كلما وجد فرق في درجة الحرارة[3]. وقد أوحى له تشبيهه الشهير (لعمل الآلة البخارية بعمل الناعورة) أن ما يسمى «القوة المحركة



نيكولاس ليونارد سادي كارنو (1796-1832)

للحرارة » تتوقف على كمية السائل الحراري (كمية الحرارة) وعلى قيمة الفرق في درجة الحرارة الذي أصاب السائل ، كما اقتضى هذا التشبيه أنه يمكن « إذا استُخدمت قوة محركة أن تعيد السائلَ الحراري من الجسم البارد إلى الجسم الحار »[3] . وقد طور كارنو أيضاً مبادئ الآلات الحرارية المثالية التي سميت باسمه وأدخل في العلم مفهومي الكمال والعكوسية .

وقد ثبط همته عدم اكتراث العلماء بعمله على الرغم من مطالعة أكاديمية العلوم المؤيدة له ، ولكن هذا لم يثنه عن مواصلة العمل في نظرية الحرارة أو عن بذل الجهد للقيام بتحسينات جديدة في تصميم الآلة البخارية ، فضلاً عن أنه بحث لمدة قصيرة العلاقة بين درجة الحرارة والضغط في الغازات إلى أن توفي بالكوليرا . ومع أنه ذكرت إشارات متفرقة لعمل كارنو بعدئذ وعلى مدى عدد من العقود التالية ، إلا أن عمله الطليعي الرائد في دراسة الحرارة لم يُعترف به على نطاق واسع إلا بعد أن نشر وليم تومسون (الذي لقب بعدئذ لورد كلفن Kelvin) سلسلة من النشرات التي كانت تعتمد كثيراً على تأملات كارنو (في كتابه) . واقترن ذلك مع تعديلات ر . كلوزيوس التي تقول ، خلافاً لصياغة كارنو ، أن بعض الحرارة يضيع في الآلة وبعضها الآخر يؤول إلى الجسم البارد . وقد اعترف رسمياً بعدئذ بأن نظرية كارنو مع تعديلاتها هي المبدأ الثاني في الترموديناميك . وهكذا تبين كم كان كبيراً ذلك العمل التجريبي الذي مهد للمرحلة التي قام في أثنائها فيزيائيو أواخر القرن التاسع عشر النظريون بدورهم المهم في إشكالية الترموديناميك .

يقوم الترموديناميك ، كما أشرنا منذ قليل ، على قانونين أساسيين هما قانونا الترموديناميك الأول والثاني (قانون الطاقة وقانون الأنتروبية) اللذان ينطبقان في جميع الظروف على جميع أحوال المادة والطاقة وعلى تفاعلاتهما (امتصاص المادة للطاقة وإصدارها وبعثرتها) ؛ وعلى الرغم من أن قوانين الترموديناميك شاملة جداً وتنطبق على جميع أحوال المادة (الصلبة والسائلة والغازية) فإنه يسهل كثيراً فهمها وصياغتها حين تطبق على الغازات . ويمكن أن توجد جميع المواد (ما عدا الهليوم احتمالاً) في الحالة الصلبة والسائلة والغازية ، وأبسطها هي الغازية التي تفهم فهماً كاملاً تقريباً ، لأن الجسيمات المكونة لها (الجزيئات أو الذرات أو الإلكترونات) تتحرك مستقلة بعضاً عن بعض بوجه عام . وحين تكون جزيئات الغاز وذراته مستقلة كلياً بعضاً عن بعض ــ وهي أبسط الحالات التي تتم عندما لا يؤثر أحدها في الآخر بأي قوة ، فتتحرك حركة عشوائية ـ يقال عندئذ أن الغاز كامل أو مثالي . ولكن غازاً كهذا لا وجود له في الطبيعة ، ومع ذلك فهو مفهوم نظري مفيد يمكن أن يُستنتج منه العديد من الاستنتاجات الصحيحة .

إن سلوك هذه المجموعة من الجسيمات (جسيمات الغاز الكامل) يستجيب لقوانين الغازات الشهيرة التي وضعها بويل وشارل وغاي لوساك . لنذكر أن قانون بويل ينص على أنه إذا ظلت درجة حرارة الغاز ثابتة فإن حجمه وضغطه لا يمكن أن يتغير أحدهما مستقلاً عن الآخر ، بل

لا بد أن يتغيرا معاً بطريقة يبقى فيها جداء الضغط في الحجم على قيمته دائماً (انظر دراسة الضغط والحجم في الفصل السادس). ولكن قانون بويل حالة خاصة جداً ولا يعطينا نظرة عميقة في خواص الغازات تكفي لأن تقودنا إلى قانوني الترموديناميك، لذلك يجب أن نمضي إلى قانون الغازات العام الذي يتحكم بسلوك الغاز عندما يتغير ضغطه وحجمه ودرجة حرارته كلها معاً. وفي هذه الحالة يمكن أن تتغير أي كميتين إحداهما بمعزل عن الأخرى، أما الثالثة فتتغير عندئذ بطريقة محددة كما ورد منذ قليل. وقد اكتشف شارل وغاي لوساك، كُل على حدة، أنه مهما فعلنا بالغاز (ضغطناه أو رفعنا درجة حرارته أو خفضناها، أو غيرنا حجمه بأي طريقة)، فإن ضغط الغاز الكامل وحجمه ودرجة حرارته يجب أن تتغير معاً بطريقة يبقى فيها حاصل قسمة جداء الضغط في الحجم على درجة الحرارة ثابتاً لا يتغير. والآن، بعد وعي هذه الفكرة، أصبح يسيراً عرض أول قانون في الترموديناميك وإدراك ما يعنيه؛ فلنعد، لأجل ذلك، إلى مفهوم الطاقة الذي درسناه بالتفصيل في الفصل السابع.

رأينا هناك أن أفضل طريقة لفهم فكرة الطاقة هي أن ندرس العمل الذي تبذله قوة على جسم ما والذي عرفناه بأنه جداء هذه القوة في انتقال الجسم باتجاهها (أي كل المسافة التي يحركها الجسم في أثناء تأثيرها فيه). فعندما ندفع جسماً أو نشده مسافة معينة نكون قد صرفنا عليه عملاً، فهو لا يبقى على حاله طبعاً كما كان قبل القيام بهذا العمل بل يكتسب شيئاً، ندعوه طاقة، لم يكن لديه قبل أن يُصرف عليه العمل. وهذه الطاقة تساوي بالتحديد العمل الذي صُرف على الجسم حين يكون حراً من كل قيد. فإذا كان العمل المصروف على الجسم لا يغيّر من ارتفاعه فوق الأرض بل يجعله يتحرك فحسب، فإن الطاقة كلها تكون عندئذ طاقة حركية. أما إذا اكتفى العمل برفع الجسم إلى أعلى مع إبقائه ساكناً، فإن الطاقة كلُها هي عندئذ طاقة كامنة. ويدل تغير سرعة الجسم على تغير طاقته الحركية، كما يعني تغير ارتفاعه تغير طاقته الكامنة. «وكرية النواس المهتز خير مثال على جسم له طاقتان كامنة وحركية تجري بينهما عملية مبادلة باستمرار».

وهكذا برزت لدى ظهور مفهوم الطاقة في الفيزياء، بصفتها نتيجة مباشرة لقوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة، المسألةُ المتعلقة بدوام هذه الطاقة أي انحفاظها؛ وهذه مسألة تتضح طبيعتها أيضاً على نحو بديع بمثال كرية النواس عند اهتزازها: فحين تكون في أعلى نقطة من تأرجحها تكون طاقتها كامنة فقط، وحين تكون في أدنى نقطة، تكون طاقتها حركية فقط. وتوحي هذه النتيجة بالسؤال التالي: هل طاقة النواس الكلية، أي مجموع طاقتيه الحركية والكامنة هو دائماً نفسه؟ إن الجواب، كما نعرف من التجربة، بالنفي لأن النواس يتوقف في النهاية، فطاقته الميكانيكية (الحركية مع الكامنة) تختفي كلياً. وكان كبار الفيزيائيين التقليديين الذين جاءوا بعد نيوتن مباشرة يعرفون ذلك، وفهموا أنه إذا لم يوجد احتكاك بين كرية النواس والهواء المحيط بها من جهة وبين خيط النواس وحامله (المسمار أو الملولب) فإن النواس يستمر في تأرجحه إلى الأبد، لأن طاقته الميكانيكية

تظل على قيمتها. كذلك تمثل حركة الأرض حول الشمس (أو حركة أي كوكب آخر) مبدأ انحفاظ الطاقة خير تمثيل؛ فحين تدور الأرض حول الشمس يتغير بعدها عنها وتتغير، من ثمَّ، طاقتها الكامنة باستمرار، وهذا ما يصح أيضاً على سرعة الأرض ومن ثم على طاقتها الحركية؛ ولكن هاتين الطاقتين تتغيران بطريقة يبقى فيها مجموعهما ثابتاً. فطاقة الأرض الميكانيكية تكون بذلك محفوظة وهذا، لحسن الحظ، من صالح الحياة على الأرض. ولو كانت الأرض تفقد طاقتها الميكانيكية باستمرار (مثل النواس أو القمر الصنعي في جو الأرض) لسقطت في النهاية على الشمس.

وكان الفيزيائيون في أواخر القرن الثامن عشر وأوائل القرن التاسع عشر يعرفون أن الاحتكاك يسلب من الجملة الميكانيكية طاقتها (مثلما يحدث في النواس مثلاً ولكنهم لم يكونوا يعرفون ما الذي يحدث للطاقة، وافترضوا ببساطة أنها تختفي؛ وهي، في الحقيقة، لا تنقص أبداً ولا تزيد بل تظهر بمظهر مختلف لم يخطر على بالهم أبداً؛ مع أنهم لو لاحظوا أن درجة حرارة الهواء المحيط بالنواس ترتفع ارتفاعاً طفيفاً عندما يتباطأ لكان بإمكانهم أن يخمنوا أن الشيء الذي يسخّن الهواء ينبعث من النواس نفسه. وكان ماير قد تعرّف هذا «الشيء» (الحرارة)، وعرَف أنه نوع آخر من الطاقة، لذلك شدد على فكرة أن مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة وكمية الحرارة يبقى ثابتاً في أي مجموعة من الأجسام التي تتفاعل فيما بينها بأي طريقة مهما كانت. وهذه النتيجة هي أساساً مضمون أول قانون في الترموديناميك.

وللتعبير عن هذا القانون الأول بأجلى صورة له، دعونا نعتبر غازاً يملأ أسطوانة شاقولية في أعلاها مكبس عديم الوزن يمكنه أن يتحرك بحرية (أي دون احتكاك)، وهي مزودة بميزان حرارة مغروس في جانبها يفيد في قياس درجة حرارة الغاز. إن فكرة الأسطوانة المزودة بمكبس مألوفة لدينا جميعاً بتجربتنا مع محركات السيارات التي تقدّر استطاعة كل محرِّك منها بعدد الأسطوانات التي يتألف منها. لنفرض الآن في مثالنا أن الغاز داخل الأسطوانة مثل الغاز الموجود خارجها، ومن ثم فالضغط داخل الأسطوانة كالضغط خارجها أي هو ضغط جوي واحد. فإذا وضعنا الآن ثقلاً فوق المكبس لاحظنا أنه يهبط مقداراً ما (وكلما ازداد الثقل ازداد مقدار الهبوط)، وأخيراً يتوقف المكبس عندما يصبح ضغط الهواء داخل الأسطوانة أعلى من الضغط الجوي بمقدار يكفيه لأن يحمل الثقل الذي فوق المكبس.

لنفرض الآن أننا سخنا الأسطوانة بوسيلة ما وجعلنا كمية معينة من الحرارة تتسرب إلى الغاز (الهواء)، فنلاحظ عندئذ مباشرة أن المكبس يرتفع وأن درجة حرارة الغاز تزداد، وهذا يعني أن الحرارة التي دخلت الأسطوانة تقوم بعمل (فهي ترفع الأثقال الموضوعة على المكبس)، وتزيد شيئاً ما في الغاز هو ما يجب أن يزيد بفضل درجة حرارته؛ وهذا «الشيء» هو طاقة الغاز الداخلية التي لا نستطيع ملاحظتها مباشرة: فكلما ارتفعت درجة الحرارة ازدادت الطاقة الداخلية. وينص القانون

الأول في هذه الحالة على أن كمية الحرارة التي أعطيت للغاز تساوي العمل المصروف على الثقل مضافاً إليه زيادة الطاقة الداخلية في الغاز . وهنا لا بد للمرء أن يعجب من مدى بساطة هذا مع أنه يتضمن معنىً عميقاً فيما يتصل بالإنسان ، إذ يمثل الفرق بين الحرية والعبودية : فقبل أن يعرف هذا القانون ظل الإنسان والماء والريح والحيوان مصادرَ العمل الوحيدة لقرون عديدة ، لذلك كان الإنسان والحيوان مادة للبيع والشراء عند أولئك الذين كانوا يتحكمون باقتصاد المجتمع وسياسته . فالعبودية إذاً ، بأي صورة من صورها ، كانت النتيجة النموذجية لهذه الأوضاع .

لقد قوض قانون الترموديناميك الأول إذاً اقتصاد الرق (وإن لم يُقض على الرق كلياً ومباشرة عند اكتشاف القانون) ، لأنه أظهر إمكان الحصول على العمل من الحرارة ، أو بعبارة أخرىٰ ، أصبح باستطاعة الإنسان أن يصنع آلة (مكونة أساسياً من أسطوانة يملؤها غاز يعلوه مكبس) تحوِّل الحرارة إلى عمل .

فما نحن بصدده إذاً كان ، في حقيقة الأمر ، أحد قوانين الطبيعة التي وعدت الإنسان بفردوس على الأرض ، لأن زوال الجهد الجسماني المضني الذي استعبد الناس ، سواءً أكانوا أحراراً أم لا ، أصبح منذ الآن وإلى الأبد ممكناً باستخدام الحرارة استخداماً صحيحاً ، ولكن هذا لا يعني ، طبعاً ، أن الثمرات الرائعة التي كان من المتوقع قطافها بفضل قانون التفاؤل هذا (كما يمكن أن ندعوه) قد أينعت فوراً ، لأن هناك غالباً خطوة طويلة بين العلم البحت الذي يكشف القانون ، وبين التقانة التي تُهيأ لاقتطاف ثمراته . وكانت أول الخُطا وأهمها في تطوير التقانة التي نشأت عن القانون الأول ، تطويرُ آلة حرارية ذات مردود مناسب كان أول نماذجها الآلات البخارية التي أدى إنشاؤها ، كما نعلم ، إلى الثورة الصناعية التي قرعت ناقوس الموت للعبودية . وكانت الخطوة الثانية ، طبعاً ، إيجاد مورد رخيص وغزير للحرارة ـــ أعني به الوقود ـــ فنُظِّمت مشاريع عديدة لاستخراج الفحم الحجري من مناجمه وحفر الآبار للتنقيب عن النفط .

ولكن سرعان ما تبين لدى تطوير الآلات الحرارية بأنواعها المختلفَة أن الطبيعة التي لا تفرض أية قيود على تحويل العمل إلى حرارة ، نراها تفرض قيداً قاسياً على تحويل الحرارة إلى عمل ، فهي تؤثر اتجاهاً على آخر في عملية التبادل عمل ـــ حرارة ، أي أنه على الرغم من أن الجهة عمل ـــ حرارة تسير تلقائياً فإن عكسها لا يكون كذلك . ففي حين يعمل الاحتكاك تلقائياً على تحويل العمل إلى حرارة نراه يفرض قيداً قاسياً على نسبة ما يمكن لآلة حرارية أن تحول إلى عمل من كمية حرارة معينة زُوِّدت بها ، ذلك لأن الأجزاء المتحركة من الآلة تحتك بالأجزاء الأخرى ، فبدلاً من أن تتحول الطاقة الميكانيكية لاحتكاك هذه الأجزاء المتحركة (المكابس مثلاً) إلى عمل مجدٍ تتحول ثانية إلى حرارة . ويمكن مبدئياً تخفيف الاحتكاك إلى أي درجة نشاء ، أما عملياً فلا يمكن ذلك إلا إلى حد معين . فالاحتكاك نفسه يحد ، كما رأينا ، من مردود الآلة الحرارية ، ولكن حتى لو أزيل الاحتكاك الميكانيكي

كلياً فإن مردود الآلة يظل أقل من 1 (إذ يعبِّر 1 عن المردود المثالي أو الكامل) وذلك بحسب قانون الترموديناميك الثاني الذي نستطيع أن نطلق عليه اسم قانون التشاؤم ، لأنه يضع قيوداً معينة على مقدار العمل الذي نستطيع الحصول عليه من الحرارة حتى في أفضل الشروط . فالقانون الأول يقوم بدور قانون مسك الدفاتر ، إن صح التعبير ، فيقول بوجوب حصول توازن في دفتر حسابات الطاقة دائماً ، سواء أحولنا العمل إلى حرارة أم الحرارة إلى عمل ، وهو لا يذكر شيئاً عن السيرورة التي تؤثرها الطبيعة من بين السيرورتين السابقتين ؛ في حين ينص القانون الثاني على ذلك ، وهو جوهر القضية بأكملها .

ويحسن بنا لفهم هذا القانون فهماً كاملاً أن نعود إلى النواس المهتز ، فنضعه هذه المرة داخل الأسطوانة المليئة بالغاز ونعلقه بمكبسها المتحرك ، فتقوم كرته عندئذ بدور الثقل الموضوع على المكبس لكي تحافظ على الضغط داخل الغاز ثابتاً . والآن نجعل النواس يتأرجح (أي نصرف عليه عملاً لكي نزوده بطاقة ميكانيكية) ثم نراقب ميزان الحرارة داخل الأسطوانة وارتفاع المكبس . فحين يتباطأ النواس في حركته إلى أن يفقد طاقتة التي زودناه بها ويتوقف في النهاية ، تزداد درجة حرارة الغاز ويرتفع المكبس،مما يعني وضوحاً أن كامل طاقة النواس عادت الآن للظهور بصورتين : صورة عمل صُرف على المكبس (زاد من طاقته الكامنة) ، وصورة طاقة داخلية في الغاز (وهذا ما يشير إليه ازدياد درجة حرارته) ، وليس ضرورياً في هذه المرحلة أن نعرف طبيعة طاقة الغاز الداخلية فهي ما ستكشفه النظرية الحركية للغازات التي سترد في هذا الفصل ، ولكننا نكتفي هنا بالإشارة إلى أن الطاقة الكامنة الابتدائية لكرة النواس تساوي بالتحديد مجموع الزيادة التي تمت في طاقة المكبس الكامنة مع الزيادة التي تمت في طاقة الغاز الداخلية .

وتوضح تجربة النواس البسيط هذه على نحوٍ وثيقٍ السمة الأساسية للقانون الثاني في الترموديناميك ، ففيها تتحول الطاقة تلقائياً في اتجاه وحيد ، من طاقة ميكانيكية إلى طاقة حرارية لا من حرارة إلى عمل . ولإلقاء مزيد من الضوء على هذه النقطة دعونا نلاحظ أن الطاقة تنطلق تلقائياً من كرة النواس على هيئة حرارة فترفع درجة حرارة الغاز الذي يتمدد عندئذ فيرفع المكبس . ولكن العمل الذي قام به الغاز في رفع المكبس أقل من الطاقة التي تلقاها على هيئة حرارة من النواس (بدليل ارتفاع درجة حرارة الغاز) . فعلى الرغم من أن طاقة النواس الميكانيكية تحولت كلها إلى حرارة ، فإن ما صُرف منها للقيام بعمل (أي برفع المكبس) ليس إلا جزءاً منها فحسب . فالجهة الطبيعية إذاً (أو التلقائية) في الطبيعة (التي يتحول فيها العمل إلى حرارة) ليست عكوسة ، وهذا ما سنرى تفسيره عند دراستنا للنظرية الحركية . وإذا دفعنا المكبس الآن إلى الأسفل ببطء لكي يعود إلى ارتفاعه السابق ، فإن درجة حرارة الغاز تزداد ، مما يدل على أن العمل الذي قمنا به قد تحول إلى حرارة ، ولكن لا شيء من هذه الحرارة أبداً يجعل النواس يهتز ، مما يعني أن الحرارة لا تُحوّل تلقائياً ثانية إلى طاقة ميكانيكية .

ولقد برز القانون الثاني بكل جلائه في الربع الأخير من القرن التاسع عشر حين بدأ العلماء يتعرفون التحولات اللاعكوسة في الطبيعة، ولما كان هذا القانون من أعمق النصوص التي صيغت عن الطبيعة وسلوكها فإننا سوف ندرس بشيءٍ من التفصيل طبيعة هذه العمليات العكوسة واللاعكوسة. يعرّف الفيزيائيون السيرورة العكوسة في جملةٍ ما بأنها تغير طفيف يحدث ببطء شديد تظل الجملة دائماً في أثنائه في حالة توازن، فيمكنها أن تسير، بحسب الظروف الخارجية، في هذا الاتجاه أو فى الآخر؛ أي إذا أُزيلت الظروف التي تعمل على تغيير الجملة تغييراً بطيئاً، فإنها تعود إلى وضعها الابتدائي. فمثلاً، إذا دفع المكبس ببطء شديد إلى داخل الاسطوانة مسافة صغيرة، فإن درجة حرارة الغاز وضغطه يزدادان عندئذ زيادة طفيفة جداً؛ ولكن إذا خُفّف الدفع على المكبس ببطء حتى يصير صفراً فإن المكبس يعود عندئذ ببطء إلى ارتفاعه السابق، وتعود درجة الحرارة إلى ما كانت عليه. وهذا مثال عن سيرورة عكوسة لا تتحقق في الطبيعة أبداً، لأن سيرورات الطبيعة لا تسير أبداً بسرعات لا متناهية في الصغر.

ونورد فيما يلي أمثلة عن سيرورات عكوسة: إن الزيادة الطفيفة في الضغط على خليط من الجليد والماء كان في الدرجة 0° س وتحت ضغط قدره ضغط جوي واحد تُسبِّب ذوبان قليل من الجليد الذي يعود إلى التجمد عندما يهبط الضغط ثانية إلى ضغط جوي واحد. كذلك عندما تنخفض درجة حرارة محلول ملحي مشبع انخفاضاً طفيفاً، يترسب شيء من الملح ولكنه يعود ثانية للانحلال عندما تعود درجة الحرارة إلى قيمتها الأولى.

ولما كان القانون الثاني وجد ليطبَّق أساساً على السيرورات اللاعكوسة فإننا سوف ندرس أمثلة متنوعة من هذا القبيل بهدف البحث عن خاصة مشتركة بينها تميزها ويمكنها أن توجهنا نحو هذا القانون. ولعل أبسط مثال هو أيضاً سلوك غاز كامل داخل أسطوانة، ولكننا سنفرض الآن أن الغاز محصور في نصف الاسطوانة بوساطة حاجز يفصله عن النصف الآخر الفارغ فإذا أزلنا الحاجز، انتشر الغاز تلقائياً ليملأ الاسطوانة بكاملها؛ فهذه سيرورة لا عكوسة لأن الغاز لن يتقلص تلقائياً ليملأ نصف الاسطوانة وحده ويدع النصف الآخر فارغاً. ولكننا نستطيع استخدام المكبس لكي نضغط الغاز إلى حجمه الأول الذي يساوي نصف الاسطوانة، غير أن هذا يحتاج إلى بذل طاقة (القيام بعمل)؛ كذلك فإن انتشار غازٍ في غاز آخر هو أيضاً سيرورة لا عكوسة نستطيع مشاهدتها فعلاً إذا كان الغازان ملوَّنيْن، فإذا كان يفصل بين غاز أزرق وآخر أحمر حاجز ثم أُزيل فإن الغازين يمتزجان عندئذ إذ يصبح لون المزيج أرجوانياً. وثمة مثال مهم وهو انتقال الحرارة تلقائياً من الجسم الحار إلى الجسم البارد عندما يكونان متلامسيْن، فالجسم الحار يبرد والجسم البارد يسخن إلى أن يصبحا معاً في درجة حرارة واحدة. ولكن لا يمكن أبداً أن تحدث السيرورة المعاكسة تلقائياً، أي انتقال الحرارة من الجسم البارد إلى الجسم الحار، وإن كنا نستطيع أن نفعل ذلك إذا بذلنا طاقة، كما يحدث في البرادات أو في مكيفات الهواء.

وترتبط بالسيرورات اللاعكوسة ظاهرة أخرى هي سمة مميزة لها ، وأعني بها تلك الفوضى التي نلاحظ اقترانها الدائم بهذه السيرورات ، أو بعبارة أخرى ، يزداد المقدار الكلي للفوضى في الكون كلما جرت سيرورات لاعكوسة . وتتم هذه النزعة إلى الفوضى على حساب الترتيب ، فيتناقص المقدار الكلي للترتيب كلما جرت سيرورة لاعكوسة ، كما يتناقص مقدار الطاقة الصالح للقيام بعمل . ونعبر عن ذلك بطريقة مختلفة فنقول : تُبدّل السيرورات اللاعكوسة الطاقة الصالحة إلى طاقة غير صالحة ، وتكون النتيجة هي ازدياد الطاقة غير الصالحة ، أضف إلى ذلك أن السيرورات اللاعكوسة تؤدي إلى نقص المعلومات عن الجملة التي تجري فيها هذه السيرورات . فإذا كانت السيرورات اللاعكوسة هي القاعدة إذاً في هذا الكون وليست الاستثناء فيه ، فإن القانون الثاني ، كما سوف نرى ، يطلعنا على أن الكون وكل ما فيه من جمل أو نُظم يسعى نحو الفوضى الشاملة التي تعني إذا ما تمت أن الكون قد وصل إلى حالة التوازن التام الذي تتوقف فيه جميع السيرورات ، وهذا يعني الموت الشامل . كذلك يقترن مع كل سيرورات الكون جريانُ الزمن وهو يتجه دائماً من الماضي نحو المستقبل ، لذلك يتبادر إلى ذهننا فوراً العلاقة بين لاعكوسية الحوادث أو الظواهر اليومية ولاعكوسية جريان الزمن ، فنحن لا نستطيع أن نتطور إلا من الماضي نحو المستقبل ، لأن هذا الاتجاه الذي يسير فيه الزمن تفرضه لاعكوسية السيرورات المحيطة بنا ، منها مثلاً حياة الفرد نفسه فهي تسير من الطفولة إلى الشيخوخة . وهنا يبرز سؤال لم يلق جواباً حتى الآن ، وهو هل ينتج جريان الزمن في اتجاه واحد من القانون الثاني في الترموديناميك ، أم أن جريان الزمن والقانون الثاني مترابطان ترابطاً مطلقاً ؟ .

فأما أن الفوضى تحدث تلقائياً حتى في أرقى الظروف تنظيماً وحتى في الوقت نفسه الذي تحدث فيه الظواهر المنظمة فهذا أمر واضح ، إذ سرعان ما تعم الفوضى في مكتب أكثر الناس تنظيماً في أثناء عمله اليومي ، كما أن الكائن الحي المنظم تنظيماً راقياً ، والذي يبني تنظيمه الخاص بنفسه (مما يتناوله من طعام وماء وأكسجين) يولِّد في الوقت نفسه فوضى (مثل الحرارة والكثير من النفايات) . ويؤدي سريان الحرارة نفسه إلى الفوضى لأنها حالما تسري تنتشر وتتبدد وتصبح نوعاً من الطاقة أكثر تشوشاً .

وخير مثال يوضح فكرة ضياع المعلومات عند حدوث سيرورة لاعكوسة هو الغاز المحصور بوساطة حاجز في نصف الوعاء الذي يحويه ؛ فنحن نعرف في البدء في أي نصف من الوعاء يوجد كل جزيء من الغاز ، ولكننا لا نعرف بعد زوال الحاجز وتمدد الغاز ليملأ الوعاء،في أي نصف يوجد أي جزيء وفي أي لحظة من اللحظات . أو بعبارة أخرى أصبحنا نعرف نصف ما كنا نعرفه من قبل عن مواضع الجزيئات .

وهكذا نرى كيف أن القانون الثاني في الترموديناميك واللاعكوسية وسريان الحرارة والفوضى

وضياع المعلومات ووحدانية الاتجاه في تغير الزمن، هي كلها أمور مترابطة. ولكن الفيزيائي لا يكتفي بمجرد الإعلان عن وجود هذه العلاقة بل لا بد له من صياغة القانون الثاني بدقة وبدلالة كميات مقيسة لأنه يبغي أن يحسب في كل سيرورة درجة اللاعكوسية والفوضى. وقد تمت صياغة هذا القانون بالفعل بعد كارنو من قِبل عالمين عمل كل منهما بمعزل عن الآخر وهما رودُلْف كلوزيوس في ألمانيا واللورد كلفن في بريطانيا.

كان كلوزيوس R.J.E.Clausius (1822-1888) ابن قسٍ واعظ، وقد تلقى تعليمه الابتدائي في المدرسة الملحقة بالكنيسة حيث كان والده يعلّم، ثم درس في مدرسة ثانوية في ستيتينْ Stettin قبل أن يدخل جامعة برلين في عام 1840 حيث درس الفيزياء والرياضيات على الرغم من ولعه الأول بالتاريخ، ثم نال الدكتوراه في هال Halle في عام 1847، وكان الدافع إلى تعيينه أستاذاً في زوريخ عام 1855 هو نشرته العلمية في عام 1850 التي تضمنت نظريته في الحرارة والأسس التي اعتمدت عليها دراسة الترموديناميك الحديثة.



رودلف يوليوس عمانويل كلوزيوس (1822-1888)

وقد تضمنت هذه النشرة أيضاً اكتشاف كلوزيوس أن نسبة محتوى جملةٍ ما من الحرارة إلى درجة حرارتها تزداد دائماً في أي سيرورة تجري في جملة مغلقة (معزولة) ؛ أما في الجملة المثالية التي تعمل بمردود كامل فلا تتغير هذه النسبة التي قال عنها كلوزيوس أنها قياس « أنتروبية Entropy » الجملة . وهذه كلمة اقتبسها كلوزيوس من اليونانية ، وقد عرّفها بأنها قياس مدى ما يمكن لجملةٍ أن تحوِّل من الطاقة إلى عمل ، فكلما ازدادت الانتروبية قلّت الطاقة التي تصلح لأن تتحول إلى عمل . وقد أثبت كلوزيوس بأن أنتروبية أي جملة (أو مجموعة) تتزايد باستمرار ، مما يقودنا إلى التفكير بأنه ما دام الكون يعرَّف بأن الجملة الوحيدة المغلقة تماماً ، فأنتروبيته تستمر في التزايد ، وكمية الطاقة فيه ، الصالحة للتحول إلى عمل ، تواصل تناقصها إلى أن تبلغ الأنتروبية حالة عظمى ويعم التوازن الحراري (أي درجة حرارة واحدة) كل أرجاء الكون . وعندئذ يصبح كل تغير فيزيائي من أي نوع مستحيلاً ، لأنه لن يحدث بعد هذا أي سريان للحرارة .

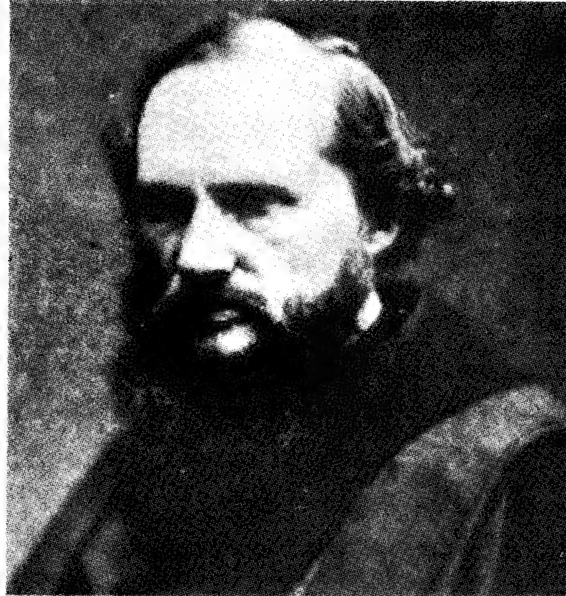
كانت أعمال كلوزيوس كلها تتميز بإدراك قوي للحقائق الأساسية ، وبمعرفة بتفاصيل ما يتصل بالظواهر وبالتشابهات في العالم الواقعي ، فدعم الجهود الرامية إلى الربط بين الحقائق والمعرفة بالرابطة الرياضية[4] . وكانت له جولة في النظرية الحركية ، فدرس نموذج كرة البليار (الذي شاع لتمثيل الجزيئات) ونقحه لكي يتضمن الحركة الدورانية والاهتزازية إلى جانب الانتقالية . وقد أثبت كلوزيوس أن اصطدام الجزيئات فيما بينها يمكن أن يحول نوع الحركة إلى نوع آخر ، ودحض بذلك الفكرة القائلة : إن جميع الجزيئات تتحرك بسرعة واحدة وثابتة[5] . كما قدم نموذج كلوزيوس الحركي أيضاً أول إثبات ميكانيكي لنظرية أفوغادرو القائلة : إن حجوماً متساوية من غازات مختلفة تحوي ، في درجة الحرارة نفسها والضغط نفسه ، العدد ذاته من الجزيئات لأن جميع الغازات تحكمها علاقة واحدة تربط ما بين درجة الحرارة والضغط والحجم ، كما أن لجميع جزيئات الغازات في درجة حرارة معينة معدل الطاقة الانتقالية نفسه[6] .

على أن كلوزيوس عُرف ،على الرغم من مؤهلاته ومواهبه،بميله إلى تجاهل التقدم الذي يحققه الآخرون حتى في مجال الترموديناميك . ويبدو أنه لم يأبه أبداً لأعمال بولتزمان ، كما لم يبحث عن تفسير ميكانيكي لميل الانتروبية إلى التزايد تزايداً لاعكوساً حتى نهاية عظمى[7] . وقد أهمل أيضاً متابعة أعمال جيبس عن التوازن الكيمياوي ، ومع ذلك فقد بذل جهداً كبيراً في تطوير نظرية كهرطيسية تقوم على انحفاظ الطاقة .

وفي عام 1867 التحق كلوزيوس بكلية فورتزبُرْغ Würzburg وتسلم عندئذ مركزه التعليمي الأخير في جامعة بون حيث ظل حتى وفاته . ونظَّم بين العامين 1870 و 1871 فريقَ مستشفى ميداني من الطلاب المتطوعين في أثناء الحرب الفرنسية البروسية التي جُرح هو نفسه فيها ، ثم قضى معظم ما تبقى من سنوات حياته غارقاً في جدل عنيف مع العلماء البريطانيين من أمثال غوثْري تيت

Guthrie Tait عمَّن اكتشف تكافؤ العمل والحرارة أهو الألماني ماير أم الإنكليزي جول .

وربما كان أبرز ممثل للجماعة العلمية البريطانية في ذلك الوقت هو ولْيَم تومسون W.Thomson (1824-1907) الذي لُقّب بعد ذلك لورد كلفن Kelvin ، وهو ابن أستاذ مهندس كان يعلِّم الرياضيات في جامعة غلاسكو . كان ولْيم تومسون خارق الذكاء حتى أنه كان يستمع وهو في الثامنة من عمره إلى محاضرات والده ويستمتع بها . وقد أنهى دراسته الثانوية في غلاسكو في عام 1834 ، حيث تخرج وترتيبه الثاني في صفه في الرياضيات ، وقد كتب أول نشرة علمية في الرياضيات وهو في الخامسة عشر فقرأها أمام الجمعية الملكية في إدنبره أستاذٌ كهل ظناً من الأعضاء أن قراءتها من قبل تلميذ مدرسة يحط من قدر أساليب الجمعية . وفي عام 1841 التحق تومسون بجامعة كمبردج حيث تفوق في الرياضيات والعلوم ونال العديد من المداليات لمهارته في التجديف الفردي في زورق سباق خفيف . وكان يقضي معظم وقته في كمبردج وهو يحضّر لامتحانات مجلس الشيوخ المضنية، فكانت مكافأته فوزُه بالمرتبة الأولى ؛ إلا أنه تأسف بعد أن وجد أن تعليمه كان خاصاً إلى حدٍ ما وأن دراسته للفلسفة الطبيعية كانت مستمدة كلياً من كتاب نيوتن « المبادئ الرياضية في الفلسفة الطبيعية » .



وليم تومسون لورد كلفن (1824-1907)

وقد سافر تومسون بعد تخرجه عام 1845 إلى باريس ليتابع دراساته العليا في مختبر رينـو Regnault ، فبدأ يهتم وهو في فرنسا بنظرية كارنو عن القوة المحركة للحرارة ، وتوصل إلى صياغة منهجية كانت فيما بعد دعامة لا تقدر لجهود مكسويل في وصف الحقل الكهرطيسي وصفاً رياضياً ، كما التقى كبار الرياضيين والعلماء الفرنسيين بمن فيهم كوشي Cauchy و دوما Dumas وأصبح حاذقاً في تقنيات المختبر الفرنسي .

وتولى تومسون عند عودته إلى اسكتلندا عام 1846 منصب أستاذ الفلسفة الطبيعية الشاغر في غلاسكو واحتفظ به قرابة خمسين عاماً ، وأعلن بعد توليه هذا المنصب مباشرة أن حساباته لعمر الأرض تُظهر أنه نحو 100 مليون سنة ، واعتمد في ذلك على افتراضه أن الأرض قد انفصلت في الأصل عن الشمس وأنها أخذت تبرد تدريجياً منذ ذلك الحين ، فأثار استنتاجه هذا خلافاً بينه وبين عدد من الجيولوجيين الذين كانوا يعتقدون أن تقدير تومسون قليل جداً ، ثم تبين عند اكتشاف التفكك بالنشاط الإشعاعي أن نظرية تومسون خاطئة ، إذ وجد أن للأرض مصدرها المشع الخاص بها الذي لم يبد عليه أنه قد نضب إشعاعه ؛ ومع ذلك فقد دفعت نظرية تومسون البيولوجيين لأن ينظروا في طرائق تمكنهم من إنقاص الزمن الذي يقدَّر أنه ضروري لتطور الحياة وأدت في النهاية إلى نظرية دي فري De Vrie عن الطفرة Mutation مما أعطى نظريـة داروِن الخاصة في التطـور زخماً وقوة .

وقد أدى تومسون أيضاً خدمة جلّى للعلم التجريبي في بريطانيا حين حصل من الجامعة على غرفة صغيرة أقام فيها أول مختبر تعليمي في بريطانيا ، كما أدى به اهتمامه بالترموديناميك إلى استخدام مبادئ كارنو لكي يستنبط سلم درجة الحرارة المطلقة المعتمدة على قانون طبيعي . وقد أتت فكرة سلم تومسون المطلق من اكتشاف الفيزيائي الفرنسي جاك شارل القائل : إن الغازات تفقد $\frac{1}{273}$ من حجمها عند الدرجة 0° سلزيوس كلما هبطت درجة حرارتها درجة واحدة ، إذ اقترح تومسون أن ما يصل إلى الصفر عند الدرجة —273° سلزيوس هو طاقة جزيئات الغاز لا حجمه ، ووجد أن ذلك يسري فعلاً على كل المواد مما دفعه لأن يستنتج أن الدرجة —273° سلزيوس يجب أن تُعد هي الصفر المطلق ، أي أدنى درجة حرارة يمكن أن توجد في الكون ، لذلك اقترح سلماً جديداً لدرجات الحرارة ، أُطلق عليه اسمه بعد وفاته ، وفيه درجة الصفر تساوي —273° س ، وسرعان ما تبنـى الفيزيائيون هذا السلم لما فيه من فائدة في دراسة الترموديناميك ومن دقة في الدلالة على كمية العمل التي يمكن الحصول عليها من آلة تعمل بين درجتيْ حرارة مختلفتين .

وقد قام تومسون أيضاً بدور رئيسي في الحض على التسليم بنظرية جيمس جول القائلة بإمكان تحويل الحرارة إلى طاقة حركية وبالعكس ، إذ إنها كانت نظرية محورية أزاحت نظرية السيالة الحرارية

بإعلانها أن الحرارة نوع من الحركة وليست هيولة (مادة) . وكان تومسون في الأصل يرفض التسليم بنظرية جول حين سمح بها لأول مرة في عام 1874 ، ولكنه رأى بعد ذلك أن وجهة نظره الخاصة عن طبيعة الطاقة تنسجم تماماً مع حجة جول ، ثم اعتنق أخيراً وجهة نظر جول في كتابه « عن نظرية الحرارة الديناميكية » الذي يوجز فيه تومسون روايته الخاصة لانحطاط الطاقة وفقاً لقانون الترموديناميك الثاني .

وقد مكنته مهاراته الرياضية من استخدام قليل من المعادلات الأساسية لشرح ظواهر مختلفة تتدرج من الترموديناميك والميكانيك إلى المغنطيسية والكهرباء ، وحاول أن يعبر عن جميع مظاهر الطاقة بمعادلات رياضية فلم ينجح في محاولته ، إلا أن اهتماماته الواسعة المتعددة مكنته من أن يقوم بدور رئيسي في جميع نظريات القرن التاسع عشر عن الطاقة فقد كان يعتقد بأن كل أنواع الطاقة مترابطةٌ فيما بينها بطريقة ما ، فدفعه هذا الاعتقاد إلى البحث عن نظرية كبرى توحِّد المادة والطاقة معاً . كما كان تومسون من قبيل الناصح الموجه لجيمس كلارك مكسويل الذي كان عمله في توحيد الكهرباء والمغنطيسية يدين بقسم كبير منه إلى بحوث تومسون الخاصة في هذا الموضوع .

ولكن لبحوث تومسون أيضاً فوائدها العملية مثل النظرية ؛ ففي عام 1842 أصدر نشرة علمية وصف فيها سريان الحرارة في الأسلاك الصلبة ، وقد استُفيد من هذه النشرة فائدة كبيرة في حل مشاكل نقل التيار الكهربائي بوساطة كبل تحت سطح البحر عبر الأطلسي مسافَة 3000 ميل ؛ وقد عينته شركة تلغراف الأطلسي بعد ذلك كبيرَ المستشارين لديها ، فترتب عليه مسؤولية خطرة هي الإشراف على المحاولات الأولى لتمديد الكبل المذكور . وقد ابتكر لأجل ذلك أجهزة عديدة كان من بينها مستقبِل تلغرافي حسَّن مردود السلك تحسيناً كبيراً ووفّر به على الشركة الكثير من الوقت والمال . وقد التحق تومسون أيضاً بشركتين هندسيتين كانتا تقومان بتمديد الكبلات تحت البحر فجعلت منه هذه الفعاليات ثرياً ثراءً مكنه من شراء يخت عابر للمحيطات وملكية في اسكتلندا تقع في لارغ شمالي آيرشَرْ .

وعلى الرغم من أن تومسون كان يستطيع أن يكتفي بما بلغه من أمجاد إذ نال مئات درجات الشرف والمكافآت ، فقد واصل العمل على تسجيل العديد من براءات الاختراع كان من بينها بوصلة بحرية وأدوات لقياس المد والجزر وسبر الأعماق . ومع كل ما كان يملكه من طاقة عقلية استمرت نشيطة حتى وفاته ، فإنه لم يكن يقبل أو حتى ينظر جدياً في أن من المحتمل أن تتصدع يوماً نظرته العلمية العالمية ، لذلك لم يكن مستعداً أبداً لتقبل التطورات التي أدت وهو في أواخر حياته ، إلى نظريتي « النسبية والكم » . ومع أنه عمل مثل نيوتن من قبله وأينشتاين من بعده ، على توحيد الكثير في الفيزياء المعاصرة له ، إلا أنه بَذَرَ ، دون أن يعلم ، بعض البذور التي شوشت في النهاية تصوره المنظَّم عن الكون .

ولكي نفهم كيف صاغ كلفن وكلوزيوس القانون الثاني، علينا أن ندرس بالتفصيل بعض الأمثلة المتنوعة من السيرورات اللاعكوسة حتى نعثر على خاصة مشتركة بينها تعبر عن جوهر هذا القانون، علماً بأن كلوزيوس كان قد بنى صياغة للقانون الثاني على لاعكوسية سريان الحرارة التلقائي من الجسم الحار إلى الجسم البارد، فنص على القانون كما يلي: لا يمكن أن تتم سيرورة تلقائية تكون نتيجتها النهائية الوحيدة هي مجرد انتقال الحرارة من جسم ذي درجة حرارة معينة إلى آخر درجة حرارته أعلى. أما اللورد كلفن فقد ركز عند تعبيره عن القانون الثاني على مسألة تحول الحرارة إلى عمل فكان نصه كما يلي: لا يمكن أن تتم سيرورة تلقائية تكون نتيجتها النهائية الوحيدة هي أن يتحول إلى عمل كمية معينة من الحرارة المستقاة من منبع أو وسط درجة حرارته واحدة في كل أجزائه، أو باختصار: لا يمكن الحصول على عمل إلا إذا سرت حرارة، ولا يمكن أن تسري الحرارة إلا إذا وجد اختلاف في درجة الحرارة.

وهكذا يتضح بسهولة إذاً أن نصيْ كلوزيوس وكلفن متكافئان، إلا أن أياً منهما لم يشر مباشرةً إلى كمية فيزيائية قابلة للقياس ويمكن أن تتغير في اتجاه واحد فحسب (كأن تزداد باستمرار مثلاً) عندما تحدث سيرورة لاعكوسة. غير أن كلوزيوس اكتشف أخيراً كمية كهذه وسماها أنتروبية المنظومة. وقد أصبح المسلّم به اليوم عموماً أن الأنتروبية أفضل وأيسر وسيلة يمكن التعبير بدلالتها عن القانون الثاني. كذلك بيَّن كلوزيوس كيف تقاس أنتروبية منظومة (أو بالأحرى كيف يقاس تغيرها عندما تحدث السيرورة)، فأصبحت أعم صيغة للقانون الثاني كما يلي: لا يمكن لمنظومة معزولة أن تتناقص أنتروبيتها أبداً، وقد تظل ثابتة على أبعد تقدير، وهذا ما يحدث حين تصل المنظومة إلى التوازن الحراري (أي عندما تصبح درجة حرارتها واحدة في كل أجزائها). فالقانون الثاني يشير بذلك إلى أن التغير يمكن أن يستمر (وسيستمر) في المنظومة المعزولة (أي في المنظومة التي لا يمكن أن تتبادل الطاقة مع الوسط الخارجي). فثمة إذاً شرطان يفرضهما قانون الترموديناميك على المنظومة المعزولة وهما ألا تتغير طاقتها الكلية أبداً وأن تزداد أنتروبيتها الكلية دائماً. ولهذين الشرطين أهمية فائقة في الديناميك الكيمياوي لأنهما يساعدان على معرفة إمكانية حدوث تفاعل كيمياوي معين في ظروف معطاة (من الضغط ودرجة الحرارة). ففي الطبيعة يحدث عادة نوعان من التفاعلات: تفاعلات ناشرة للحرارة Exothermic، أي تطلق حرارة، وتفاعلات ممتصة للحرارة Endothermic؛ ويصعب، بوجه عام، أن نعرف لماذا تحدث التفاعلات الممتصة للحرارة، ولكن قانون تزايد الأنتروبية يشرح السبب في ذلك.

وثمة جانب آخر للقانون الثاني وهو أن تزايد الفوضى يمكن، للوهلة الأولى أن يبدو لغير العارف متناقضاً مع تجربتنا اليومية؛ لأننا نعرف أن التنظيم التلقائي يتم باستمرار في الكون: فالمواد الغازية والغبار تنتظم تلقائياً في نجوم وكواكب وتنظِّم النجوم نفسها في مجرات، وتنتظم النوى الخفيفة

التي في باطن النجوم الحارة جداً في نوى ثقيلة جداً، وتنظم الذرات نفسها في الفضاء البارد بين النجوم وفي الكواكب الدافئة لتكون جزيئات معقدة؛ وأخيراً، لدينا هنا على الأرض جزيئات معقدة تتجمع لتكوّن أرقى البنى تنظيماً في الكون، وأعني بها الخلايا الحية. لذلك يجادل أصحاب نظرية خلق الكون، نتيجة فهمهم السيىء للقانون الثاني، أن هذه البنى الراقية التنظيم هي من نتاج فعل الخلق، لأنهم يعتقدون بغير حق أن خاصة الفوضى في القانون الثاني تمنع تكوّن أشكال المادة الراقية (أو تطورها) تلقائياً من المواد الأبسط شكلاً.

ويتضح خطأ هذا الاعتقاد، وأنه دليل على سوء فهم القانون الثاني، من المثال البسيط التالي: لنعتبر وعاءً مغلقاً يحوي نوعين من الذرات A وB تتحرك متنقلة بحرية في درجة حرارة معينة، ولنفرض أنه لم تكن هناك في البدء أي بنية أخرى قبل أن يتاح للذرات أن تتبادل التأثير، ثم تكونت مع الزمن بنى أخرى هي الجزيئات BA، عندئذ تكون بعض الذرات قد نظمت نفسها في جزيئات هي نوع من التنظيم أرقى من مجرد ذرات حرة، فهل يعني ذلك خرقاً للقانون الثاني؟ كلا، لأننا يجب أن نأخذ بالحسبان عند تعيين الأنتروبية أو حسابها جميع مكونات الجملة، وهذا ما لم يتحقق في الشواهد المذكورة أعلاه، فعندما تتكون الجزيئات BA من ذرتين A وB يجب أن تنطلق طاقة، ولا بد بالتالي أن تضاف أنتروبية هذه الطاقة إلى أنتروبية مادة الوعاء كلها ومحتوياته وعندئذ يجد المرء أن الأنتروبية الكلية للجملة تصبح بعد تكون الجزيئات أكبر دائماً من أنتروبية الجملة عندما كانت الذرات موجودة وحدها، إذ أن أنتروبية الطاقة التي انطلقت من تكون الجزيئات أكبر من أن يكافئها نقصان أنتروبية الجزيئات وهكذا يكون قد تناقص الترتيب الكلي وتزايدت الفوضى.

رأينا أن السيرورات التي تتم بصورة طبيعية (أو تلقائياً) هي سيرورات لاعكوسة وأنه يصاحبها تزايد في الأنتروبية وأن هذه السيرورات يمكن أن تستمر ما دامت أنتروبيتها يمكن أن تستمر في الزيادة (أي لم تبلغ نهاية عظمى)، ولكننا لم نصف كيف يمكن قياس تغير أنتروبية الجملة، إذ يجب أن نلاحظ أن ما له دلالته هو تغير أنتروبية الجملة لا مقدارها؛ وهنا نستطيع أن نقدّم عن هذه النقطة دراسة مختصرة وأولية فحسب، وسنتبع فيها تحليل كلوزيوس لأنه استند، على الأرجح، في تعريفه لتغير الأنتروبية إلى دراسة كارنو مردود الآلات الحرارية. وكان كارنو قد لاحظ أنه مهما تضاءل الاحتكاك في الآلة الحرارية فإن مردودها يظل دائماً أقل من 100% مما دفعه إلى التفكير في أن هناك شيئاً طبيعياً جداً في الآلة هو الذي يحد من مردودها (وهذا الشيء كامن في طريقة تحول الحرارة إلى عمل). ولدى ملاحظته هذه عثر على القانون الثاني في الترمودىناميك بصورة تقريبية، ويرجّح أنه كان باستطاعته أن يصل إلى ذلك لو أن القانون الأول كان معروفاً عند قيامه بهذا العمل؛ ومهما يكن من أمر، فإن الكثيرين من مؤرخي العلم ينظرون إلى كارنو على أنه مبتدع الترموديناميك.

ولكي نرى كيف أدى تحليل كارنو للآلات الحرارية إلى مفهوم الأنتروبية يحسن بنا أن نعود إلى

أسطوانتنا ذات المكبس المملوءة بالغاز ونعالجها كما في السابق على أنها آلة حرارية بسيطة جداً ونجعلها تقوم بدورة كاملة بدءاً من وضع معين لكي تعود عبر سلسلة من المراحل إلى هذا الوضع الابتدائي ، ولنلاحظ عند قيامنا بذلك أنه عندما تعود جملة متغيرة إلى وضعها الابتدائي يجب أن تعود جميع خواصها المميّزة (ضغطها وحجمها ودرجة حرارتها وطاقتها الكامنة وأنتروبيتها طبعاً) إلى قيمتها الابتدائية . ولكي نجعل آلتنا تقوم بعمل ما ، نضع فوق مكبسها أثقالاً تبقي الضغط داخل الغاز ثابتاً ، ثم نضع الأسطوانة على صفيحة حارة (على غطاء موقد مثلاً) درجة حرارتها عالية معينة ، فيتمدد الغاز عندما تتسرب الحرارة من الصفيحة إليه داخل الأسطوانة ويرتفع المكبس ، فتقوم الآلة (أي الغاز) بعمل في حين تبقى درجة حرارته ثابتة لأنه على تماس دائم مع الصفيحة الحارة التي لا تتغير درجة حرارتها . وهكذا تظل درجة حرارة الغاز طيلة الوقت مساوية لدرجة حرارة الصفيحة ، ففي هذه المرحلة من دورة الآلة تتحوّل الحرارة كلها إلى عمل ، حتى ليبدو لنا عندئذ ، ما لم نقم بتحليل أعمق ، أن مردود آلتنا البسيطة هو 100% لأن كل الحرارة التي تلقتها تحولت إلى عمل تجلّى في ارتفاع الطاقة الكامنة للأثقال التي يمكن بهذه الطريقة رفعها إلى أي ارتفاع نشاء . ولكن آلة كهذه ، ستبدو عديمة الفائدة إذا أوقفنا دورتها عند هذه المرحلة ، لأننا لا نستطيع أن نستخدمها سوى مرة واحدة ؛ أما إذا أردنا أن نرفع أثقالاً أخرى (باستخدام الآلة نفسها مرة أخرى) فعلينا أن نعيد المكبس إلى وضعه الابتدائي .

دعونا إذاً نواصل دورتنا ونرفع الأسطوانة عن الصفيحة . إن الغاز ، كما هو واضح ، سيظل على حاله من التمدد وعلى حاله من إمكان القيام بعمل ، لأنه لا يزال حاراً ، ولكنه في هذه المرحلة من دورته يبرد ، فدعونا نرفع الأثقال الآن عن المكبس وندفعه ببطء شديد إلى أسفل حتى يعود إلى وضعه السابق وعند ذلك نستطيع استخدامه مرة ثانية لتحويل الحرارة إلى عمل . ولكن عندما نضغط الغاز نقوم بعمل ، وهذا واضح ، أي أننا نعيد شيئاً من العمل الذي حصلنا عليه من الحرارة غير أننا لم نعده كله . ويتجلى هذا العمل ، الذي نقوم به ، على هيئة حرارة ندعها تفلت من الأسطوانة لكي تبقي درجة حرارة الغاز ثابتة طيلة قيامنا بهذا العمل . ولما كنا لا نستطيع بهذا العمل وحده أن نعيد الغاز إلى درجة حرارته الأصلية ، والمكبس إلى وضعه السابق (لأننا نكون قد أعدنا كل العمل الذي كسبناه) ، لذلك نثابر على ضغط الغاز ولكن من دون أن ندع الحرارة تفلت الآن من الأسطوانة إلى أن يعود المكبس إلى وضعه الأصلي ودرجة الحرارة إلى ما كانت عليه ، وعندئذ تكون الآلة قد أكملت دورتها وأصبحت جاهزة لأن تقوم بعملها مرة ثانية .

وهنا ، رأى كارنو عند تحليله لهذه الدورة أنه مهما بذل من عناية في صنع الآلة ، ومهما خفض احتكاك المكبس مع جوانب الأسطوانة ، فإنه لن يتوصل أبداً إلى جعل الآلة (الأسطوانة مع المكبس مثلاً) تعمل بمردود 100% ، لأن هذه الآلة يجب أن تفقد شيئاً من الحرارة التي تأخذها من

المنبع الحار، ومن ثم فإن العمل الذي تقوم به آلة حرارية لا يمكن أن يكون مساوياً للحرارة التي تمتصها في المرحلة الأولى من دورتها، لأن هذا العمل يساوي الفرق بين تلك الحرارة والحرارة التي تطلقها إلى المحيط البارد في مرحلة الارتداد من الدورة (أي في النصف الثاني من الدورة عند عودة الآلة). وقد قام كلوزيوس بتحليله منطلقاً من هذه النقطة، فرأى أنه إذا سرت الحرارة مباشرة من المنبع الحار إلى المحيط البارد من دون أن تكون هناك آلة على الإطلاق، فإن النتيجة ستختلف كلياً، إذ لا شيء من الحرارة يتحول عندئذ إلى عمل. ولكن في الحالتين (وفي الثانية أكثر من الأولى) تتسرب كمية من الحرارة من المنبع الحار (الخزان الحراري) إلى المحيط البارد (البالوعة الحرارية)، مع الفارق بأن الحرارة في الحالة الأولى تقوم بعمل مفيد أما في الثانية فلا، لذلك تكون كمية الفوضى (أو تزايد الأنتروبية) المتولدة عند انتقال الحرارة من الخزان إلى المحيط أقل في الحالة الأولى منها في الثانية، فالفارق الوحيد بين سريان الحرارة في الحالة الأولى وسريانها في الثانية هو أن الحرارة في الحالة الأولى دخلت الآلة بدرجة حرارة مرتفعة ثم غادرتها بكمية أخرى وبدرجة حرارة منخفضة. وهكذا أصبح واضحاً الآن أن كمية الحرارة السارية ودرجة الحرارة عند سريانها هما العاملان اللذان يحددان تغير الأنتروبية. وقد عرّف كلوزيوس تغير أنتروبية جملة بأنه يساوي حاصل قسمة كمية الحرارة التي تكسبها أو تفقدها على درجة حرارتها المطلقة عند حدوث هذا الكسب أو الفقدان؛ ويؤدي فقدان الحرارة إلى نقصان الأنتروبية وكسبها إلى زيادة الأنتروبية. ويعود السبب في ارتباط الأنتروبية بكسب الحرارة أو بفقدانها إلى أن الحرارة، كما سنرى في دراستنا النظرية الحركية، تؤدي إلى الحركة العشوائية أو الفوضى.

النظرية الحركية

كانت النظرية الحركية، التي تسمى غالباً النظرية الحركية للغازات، نتيجة لا مناص منها للمبدأ الأول من الترموديناميك؛ فمن الواضح أنه إذا كانت الطاقة الناشئة على صورة حرارة محفوظة حقاً، ثم ظهرت كطاقة داخلية عند تسخين الغاز، فإن هذه الطاقة الداخلية لا بد أن تكون طاقة مكونات هذا الغاز (أي طاقة جزيئاته). ومع ذلك، فقد لاقى المدافعون عن النظرية الحركية في سنواتها الأولى صعوبة فائقة في أن تلقى استجابة حسنة لدى جماعاتهم العلمية ناهيك عن مسألة القبول بأفكارهم؛ فالكيميائي أوستفالد والفيزيائي ماخ ظلا حتى العقد الأول من القرن العشرين يرفضان النظرية الذرية والجزيئية في المادة. ولكن مفاهيم النظرية الحركية كانت في أذهان بعض أعظم العلماء والرياضيين منذ أواخر القرن السابع عشر وبداية القرن الثامن عشر؛ ومن هؤلاء نيوتن فهو يقول في كتابه البصريات:

«يبدو لي مرجحاً أن الله قد كون المادة عند بداية الخليقة من جسيمات صلبة كثيفة قاسية

ومتحركة ولا يمكن النفاذ منها ولها أحجام وأشكال وخواص أخرى ، وهي موزعة في الفضاء بنسب مختلفة لكي تفضي على أفضل وجه إلى الغاية التي لأجلها كون الله المادة ، وتكون هذه الجسيمات الأولية بصلابتها قاسية لا مثيل لقساوتها بين كل الأجسام المسامية النفوذة التي ركّبها منها ، وهي قاسية لدرجة أنها لا تبلى أبداً ولا تتحطم إلى أجزاء ، إذ لا توجد قوة مألوفة قادرة على تقسيم ما جعله الرب واحداً في بداية خلقه . ولما كانت هذه الجسيمات تبقى كاملة لا تتجزأ ، فهي لذلك يمكن أن تؤلف أجساماً لها على مدى الأجيال طبيعة واحدة ونسيج واحد . أما لو قُدر لها أن تفنى نهائياً أو أن تتحطم إلى أجزاء لتغيرت طبيعة الأشياء المتعلقة بها ، ولكان الماء والتراب ، اللذان تكونا من جسيمات بالية وأجزاء الجسيمات ، من طبيعة ونسيج مختلفين تماماً عن طبيعة ونسيج الماء والتراب اللذين تكونا منذ بدء الخليقة من جسيمات كاملة »[8] .

وهكذا يلح نيوتن في هذه الفقرة على دوام الجزيئات (جسيمات المادة) وعلى عدم إمكان تحطيمها أو تدميرها .

وبعد ذلك ، نشر الرياضي والفيزيائي السويسري العظيم د . برنولي D.Bernoulli في عام 1738 نشرة علمية عن الهدروديناميك (تحريك السوائل) عرض فيها الجوانب الأساسية في النظرية الحركية بوضوح . وهذا ما نستدل عليه من القسم الموجز المقتطع من تلك النشرة :

« 1- حين نتأمل في الموائع المرنة (الغازات) ، نجد أننا نستطيع أن ننسب إليها تكويناً يتسق مع جميع خواصها الأخرى التي لم تَحظَ بعد بما يكفي من البحث . وتتصف الموائع بالخواص الهامة التالية : 1- إنها ثقيلة (أي ذات كتلة) . 2- إنها تنتشر في جميع الاتجاهات إلا إذا حُصرت . 3- يمكن أن نضغطها قدر ما نشاء كلما زدنا قوة الضغط عليها . والهواء جسم من هذا النوع تلائمه هذه الدراسة بوجه خاص .

2- لنعتبر وعاءً أسطوانياً في وضع شاقولي مزوداً بمكبس متحرك وضع فوقه ثقل P ، ولنفرض أن الأسطوانة تحوي جسيمات صغيرة جداً تتحرك هنا وهناك حركة سريعة جداً حتى ليمكن القول أن هذه الجسيمات تؤلف بضرباتها المتلاحقة على المكبس ومنعها له من السقوط بسبب اصطدامها المتكرر به مائعاً مرناً (غازاً) يمكن أن يتمدد وينتشر من تلقاء نفسه فيما لو أزيح الثقل عن المكبس أو أنقص ؛ أو يمكن أيضاً تكثيفه إذا زيد الثقل عليه . وهو يؤثر بثقله على قعر الوعاء الأفقي كما لو لم يكن مزوَّداً بقوى مرنة . ذلك لأن الجسيمات تحافظ على ثقلها سواء أكانت ساكنة أم متحركة ، وهذا يعني أن قعر الوعاء لا يتحمل ثقل المائع فحسب بل ضغطه (الناجم عن مرونته) . لذلك يمكن أن نستبدل مائعاً كهذا بالهواء ، لأن خواصه تتفق مع تلك التي نسبناها منذ قليل للموائع المرنة (للغازات) ، كما أننا سنفسر بهذه الخواص خواص أخرى كنا قد وجدناها للهواء ، كما سنشير إلى خواص أخرى لما تنل بعد ما يكفي من الدراسة .

3- لنعتبر أن عدد الجسيمات الموجودة في الأسطوانة لا نهائي عملياً ، وسنفترض أنها حين تَشْغل الفضاء تكوّن هواءً عادياً تتخذ منه معياراً أساسياً نستند إليه في جميع قياساتنا . وهكذا فإن الثقل P الذي يُبقي المكبس في موضعه لا يختلف عن ضغط (ثقل) الجو الواقع على المكبس والذي سنشير إليه لهذا السبب بالحرف P في كل ما يلي »[9] ....

يلاحظ من هذا النص مدى تقارب أفكار برنولي من أفكارنا الراهنة، ولكن هناك ما هو أجدر بالملاحظة وهو بحث الفيزيائي البريطاني ج. ج. وترستون J.J.Waterston الذي قدم للجمعية الملكية في عام 1845 نشرة علمية استنتج فيها كثيراً من خواص الغازات المعروفة جيداً بما فيها العلاقة الأساسية بين درجة حرارة الغاز وضغطه وبين حركات جزيئاته؛ كما أنه كان أول من بيّن أن درجة حرارة الغاز تتعين بمربع سرعة جزيئاته الوسطى، وأن ضغط الغاز يتناسب مع جداء عدد جزيئاته في السنتيمتر المكعب (أي الكثافة الجزيئية) في مربع سرعة هذه الجزيئات الوسطى؛ ولكن لم تظهر نشرة وترستون لسوء الحظ، بل طويت في سجلات الجمعية بسبب التقرير السيء الذي رفعه المحققان اللذان أُسندت إليهما مهمة دراسة النشرة[10]، وقد أفاد أحدهما بأن «النشرة لا معنى لها حتى أنها ليست جديرة بأن تقرأ أمام الجمعية»؛ أما الآخر، فكان عقله أكثر تفتحاً إذ لاحظ أن الورقة «تعرض الكثير من المهارات وعدداً من الحقائق التي تتفق اتفاقاً يلفت النظر مع الوقائع...، ولكن المبدأ الأصلي ليس.... في جميع الأحوال أساساً مرضياً لنظرية رياضية». وتُظهر هاتان الإفادتان كيف كان يُستخف كثيراً بوجه عام بالمفهوم الجزيئي (النظرية الحركية) في ذلك الزمن، غير أن نشرة وترستون ظهرت أخيراً في عام 1892 بإلحاح من الفيزيائي البريطاني لورد رايْلي الذي صدَّرها بمقدمة منه.

ولكن التقدم العظيم في النظرية الحركية كان قد حدث منذ عام 1860، وذلك عندما نشر جيمس كلارك مكسويل بحثاً في المجلة الفلسفية بعنوان «توضيح النظرية الديناميكية في الغازات» مرفقاً بعنوان صغير «عن حركة كريات تامة المرونة واصطداماتها». ففي هذه النشرة يبين مكسويل جوهر النظرية الحركية في الغازات منذ الفقرة الأولى إذ يقول:

«يمكن أن نستنتج كثيراً من خواص المادة، ولا سيما حين تكون في حالتها الغازية، من الفرضية القائلة أن أجزاءها الدقيقة تتحرك بسرعة وأن سرعتها تزداد مع تزايد درجة الحرارة حتى أن الطبيعة الدقيقة لهذه الحركة يمكن أن تصبح موضوع دراسة عقلانية. وكان دانييل برنولّي وهيراباث وجول وكروني وكلوزيوس وغيرهم قد بينوا أنه يمكن تفسير العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة والكثافة في غاز كامل بافتراض أن الجسيمات تتحرك بسرعة منتظمة وفي خطوط مستقيمة أو أنها تصطدم بجوانب الوعاء الحاوي، وأن هذا الاصطدام هو الذي يحدث الضغط. وليس ضرورياً أن نفرض أن كل جسيم يتحرك مسافة كبيرة على خط مستقيم لأن الأثر في إحداث الضغط يظل هو نفسه حين تصطدم الجسيمات أحدها بالآخر، مما يعني أن الخط المستقيم المذكور يمكن أن يكون قصيراً جداً. وكان كلوزيوس قد عين طول المسار الوسطي بدلالة المسافة الوسطى بين مركزي جسيمين حين يحدث التصادم وليس لدينا حالياً وسيلة تجريبية تؤكد صحة أيٍ من هاتين المسافتين. ولكن ثمة ظواهر، مثل احتكاك الغازات الداخلي وانتقال الحرارة عبر الغاز وانتشار غاز في غاز آخر، يبدو أنها تكشف بدقة إمكان تعيين المسافة الوسطى التي يقطعها جسيم بين اصطدامين متتاليين؛ ولكن تحريات كهذه يجب أن تبنى على قاعدة من المبادئ الرياضية الصارمة، لذلك سأبرهن على قوانين حركة عدد لا نهاية له من الكريات الصغيرة الصلبة التامة

المرونة التي لا تؤثر إحداها في الأخرى إلا عند التصادم.

فإذا وجدنا أن خواص هذه المجموعة من الكريات تتفق مع خواص الغازات فإننا نكون قد عثرنا على تشابه فيزيائي هام يمكن أن يقودنا إلى معرفة أدق عن خواص المادة؟ أما إذا لم تتفق التجارب الجارية على الغازات مع فرضيات هذه الافتراضات فعندئذ يكون قد ثبت بأن نظرتنا على الرغم من اتساقها مع ذاتها ليست قادرة على تفسير ظواهر الغازات؛ ولا بد لنا في جميع الأحوال من متابعة نتائج الفرضيات.

وبدلاً من أن نقول عن الجسيمات إنها صلبة وكروية ومرنة، يمكن أن نقول، إذا شئنا، إنها مركز قوة ليس لها تأثير ملموس إلا على مسافة صغيرة حيث يظهر هذا التأثير فجأة على صورة قوة دافعة شديدة جداً. ومن الواضح أن الفرضيتين تؤديان إلى النتيجة نفسها. ولذلك ولكي نتجنب تكرار الجمل الطويلة عن هذه القوى الدافعة سأتبع فرضية الأجسام الكروية التامة المرونة. فإذا افترضنا أن لمجموعات الجزيئات هذه التي تتحرك معاً سطحاً يحدها وأنه غير كروي فإن الحركة الدورانية تقوم بتزويد الجملة بحصة من (القوى الحية) الكلية كما سبق أن بيَّن كلوزيوس، ونستطيع بهذه الطريقة أن نعلل السبب في الحرارة النوعية أكبر مما نحصل عليه بالاعتماد على الفرضيات الأبسط...».

إن الفكرة كلها من النظرية الحركية هي إظهار أن خواص الغاز الجهرية (المحسوسة أو الكبرية) كطاقته الداخلية مثلاً أو ضغطه أو درجة حرارته يمكن أن نجد أسبابها في خواصه المجهرية (الصغرية)، أي في الحركات العشوائية التي تقوم بها الجسيمات (أو الجزيئات) المكونة له والتي افترضها مكسويل كريات صغيرة صلبة مرنة تتحرك عشوائياً كيفما اتفق وتتصادم إحداها مع الأخرى. والمقصود من كلمة (مرنة) هو أنه إذا تصادمت كرتان منها فإن كلاً منهما ترتد عن الأخرى من دون أي خسارة طاقية، أي أنه لا تتولد حرارة في أثناء هذه التصادمات، ومن ثم لا يوجد نقصان في الطاقة الحركية الكلية للجزيئين. ومن الواضح أنه يجب أن يتم الأمر بوجه عام، على هذا النحو (على الأقل إذا لم تكن درجة الحرارة عالية جداً)، وإلا، لو فقدت الجزيئات شيئاً من طاقتها الحركية في كل تصادم، لسارت كل جزيئات الغاز بسرعة نحو السكون ولسقطت على الأرض، وهذه نتيجة سخيفة قطعاً.

وتعلل النظرية الحركية ضغط الغاز بسهولة، فهي تعبر عنه بمعدل اصطدامات الجزيئات بجدران الوعاء الحاوي. ويدخل في هذا التحليل عاملان: أولهما عدد صدمات الجزيئات على وحدة مساحة من الجدار والتي تحدث في ثانية واحدة، وثانيهما تأثير الصدمات أو وسطي شدتها، فكلما ازداد عدد الصدمات في الثانية الواحدة على مساحة معينة من الجدار وازدادت أيضاً قوة الصدمات، ازداد الضغط. ويتوقف تواتر صدمات الجزيئات، كما هو واضح، على كثافة الجزيئات وعلى سرعتها المتوسطة، إذ كلما ازداد عدد الجزيئات في وحدة الحجم وتحرك الجزيء حركة أسرع وسطياً ازداد عدد الاصطدامات بالجدار في الثانية الواحدة. أما شدة الصدمة الواحدة فتتوقف على جداء سرعة الجزيء المصطدم في كتلته (أو ما يدعى اندفاعه). وهكذا تُعلمنا النظرية الحركية أن

ضغط الغاز على جدران الوعاء الحاوي يتوقف على الكثافة الجزيئية (عدد الجزيئات في السنتيمتر المكعب) وعلى كتلة الجزيء الواحد وعلى مربع سرعة الجسيم المتوسطة.

وترتبط هذه النتيجة التي انبثقت من الوصف المجهري للمادة (وهي الغاز في هذه الحالة) بالصورة الجهرية (الترموديناميكية) بطريقتين، فنلاحظ أولاً أن الترموديناميك يؤدي إلى علاقة بين ضغط الغاز ودرجة حرارته ــ الضغط يتناسب مع درجة الحرارة ــ أما النظرية الحركية فتعطينا علاقة بين ضغط الغاز ومتوسط طاقة حركة الجزيء فيه (لأن طاقة حركة الجزيء تساوي نصف جداء كتلته في مربع سرعته). وهكذا نستنتج علاقة بين درجة حرارة الغاز ومتوسط طاقة الجزيء الحركية، وهي أن درجة حرارة الغاز تتناسب مع متوسط طاقة الحركة الجزيئية.

وتؤدي النظرية الحركية إلى نتيجة مهمة أخرى وهي أنه عندما تنتقل طاقة من نوع ما (حرارية أو ميكانيكية) إلى الغاز فإنها تتوزع (وسطياً) بالتساوي بين جزيئاته، وتسمى هذه الخاصة «نظرية (أو قانون) تساوي توزع الطاقة»، ولا يعني ذلك أن الطاقة الحركية لكل جزيء في الغاز هي نفسها، بل تتغير الطاقة الحركية من جزيء إلى آخر ولكن بفروق صغيرة فحسب، وتظل الطاقة الحركية إجمالاً قريبة من قيمة متوسطة كان مكسويل أول من حسبها في نشرته المشار إليها والتي أعطى فيها أيضاً قانوناً لتوزع سرع الجسيمات في الغاز، مما قوى الاعتقاد بالجزيئات وبالنظرية الحركية في الغازات، وبرهن في الوقت نفسه على قوة هذه النظرية بصفتها وسيلة تحليلية في الفيزياء النظرية.

وهكذا أحال مكسويل والعلماء وأنصار النظرية الحركية كثيراً من خواص الغازات الجهرية (المحسوسة) مثل الضغط ودرجة الحرارة والطاقة الداخلية والأنتروبية إلى ديناميك الحركات الجزيئية، فبرهنوا بذلك على أن قوانين الغازات هي في الدرجة الأولى نتائج لقوانين نيوتن في الحركة، مما يدل على أنه إذا وُجدت تناقضات بين بعض خواص الغازات الملاحظة كحراراتها النوعية مثلاً وبين الخواص التي استُنتجت من قوانين الغازات بالحساب، فعندئذ يكون صلاح قوانين نيوتن في الحركة موضع ريبة. وكان مكسويل قد أشار إلى تناقض كهذا لم يُفسر إلا بعد ظهور نظرية الكم، وهذا ما سنراه في الفصل الثاني عشر التالي.

الميكانيك الإحصائي

يقترن تطور الميكانيك الإحصائي الذي أصبح أحد فروع الفيزياء المهمة بأربعة أسماء لامعه هي: جيمس كلارك مكسويل، جوزيه فيلارجيبس، لُدفيغ بلتزمان وأينشتاين. وهو، كما يدل عليه اسمه، ليس سوى تطبيق طرائق الإحصاء الرياضي على تحليل الجمل الفيزيائية وخواصها وبنائها وسلوكها، كما يعتمد أيضاً على المفاهيم نفسها التي تعتمد عليها النظرية الحركية، فهو لهذا السبب

يرتبط بالنظرية الحركية ارتباطاً وثيقاً ، حتى ليمكن أن تُعد نشرة مكسويل عن حساب سرعة الجزيئات الوسطى في الغازات وتوزع السرع الجزيئية،مساهمة هامة في النظرية الحركية أو أول خطوة في تطوير الميكانيك الإحصائي ؛ ولذلك تسمى صيغة مكسويل في توزع السرع الجزيئية التي تعطي عدد الجزيئات التي تقع سرعها في مجال معين « صيغة مكسويل ــ بولتزمان » ، لأن بولتزمان استنتجها مرة ثانية بعد مكسويل بثلاثين عاماً من وجهة نظر إحصائية محضة ، وهي ، في حقيقة الأمر ، صيغة أساسية في الميكانيك الإحصائي .

كان لدفيغ بولتزمان (1844-1906) فيزيائياً نمساوياً استخدم الميكانيك الإحصائي لإثبات أنه يمكن استنتاج قانون الترموديناميك الثاني بتطبيق قوانين الميكانيك ونظرية الاحتمالات على حركات الذرات ؛ إذ يُظهر تأويل القانون الثاني إحصائياً أن شرط توازن الجملة الترموديناميكي يعني أن تكوُن الجملة في الوضع الأكثر احتمالاً ؛ وقد قاد هذا التأويل بولتزمان إلى استنتاج نظرية تساوي توزع الطاقة التي تبين أن متوسط طاقة ذرة متحركة هي نفسها في جميع الاتجاهات .

كان بولتزمان ابن موظف مدني في فيينا ، تابع دراسته في لنتز Linz وفيينا ثم حصل على الدكتوراه من جامعة فيينا في عام 1866 ، وقد عمل وهو طالب مع جوزيف ستيفان الذي أثبت أن الإشعاع الكلي الذي يطلقه جسم حار يتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارته المطلقة (أي إذا تضاعفت درجة الحرارة المطلقة فإن الإشعاع يزداد مقداره 16 مرة) . وقد توصل بولتزمان إلى هذا المبدأ نفسه من الترموديناميك لكي يتمم ما يعرف اليوم بقانون ستيفان ــ بولتزمان[11] ، ومع أن لهذا القانون دوراً بارزاً في تطور نظرية الكم ، فقد استخدمه الفلكي البريطاني السير آرثر إدِّنغتون في عشرينيات القرن الحالي لحساب توازن الأجواء النجومية .

وقد عُيِّن بولتزمان أستاذاً للرياضيات والفيزياء في فيينا وغراتْز ومونيخ على التوالي ، وكان أيضاً من علماء القارة الأوائل الذين تعرفوا أهمية نظرية مكسويل واستغنى عن الفرض القائل أن جميع الذرات تتحرك بالسرعة نفسها تقريباً ، وأن المسافات بينها متساوية ، فأصبحت دالة التوزيع تعطي احتمال أن توجد ذرة في مجال معين للسرعة والوضع بدلاً من أن تعطي إحداثيات كل ذرة أو سرعتها . كذلك يثبت تحليله لدالة مكسويل أن في الجملة كمية طاقة كلية محددة يمكن أن تتوزع بالتساوي بين الجزيئات المكونة للجملة[12] .

ولقد توصل بولتزمان من أبحاثه في الاحتمالات والميكانيك الإحصائي إلى صياغة نظريته التي تدعى النظرية H- (H-theory) والتي أظهرت بوضوح تام التناقض الظاهري بين عكوسية اصطدامات الذرات الفردية واللاعكوسية التي تنبأت بها النظرية الخاصة بجملة كثيرة الجزيئات[13] ، إذ أثبت بولتزمان أنه في حين يمكن أن يكون هناك تزايد عشوائي في النظام (أو عكوسية في الأنتروبية) في حالة عدد قليل من الاصطدامات ، فإن الغالبية العظمى من

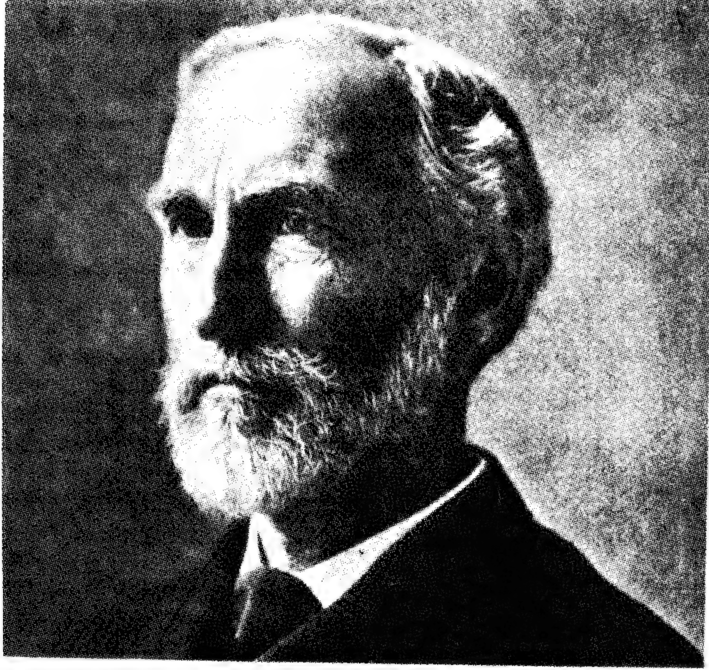
الاصطدامات الممكنة تسعى نحو فوضى أشد، وأنه لا ضمانة إحصائياً للعودة إلى الوضع الابتدائي إلا إذا انتظر المرء مدة زمنية طويلة لا يمكن تصورها، فلو تركت مثلاً جزيئات عطرٍ تنطلق من زجاجته وتملأ كل جو الغرفة لكان عدد السنين المتوقع لكي يحدث العدد الكافي من الاصطدامات وتعود كل جزيئات العطر إلى الزجاجة هو 10^{60} سنة. وهكذا رأى بولتزمان أنه من الممكن أن يحدث على الصعيد الكوني تناقص موضعي في الانتروبية حتى حين يكون الكون نفسهُ سائراً نحو أنتروبية عظمى لا مناص منها[14].

لقد استُقبلت أعمال بولتزمان، على الرغم من مساهمتها العظيمة بالنظرية الذرية، بهجوم عنيف من قِبل أصحاب «مذهب الطاقة» من أمثال إرْنسْت ماخ Mach الذي لم يكن يقبل بالذرة إلا على أساسٍ من أنها بدعة رياضية ملائمة، لا على أنها شيء فيزيائي موجود، ومن أمثال ج. هلْم Helm الذي نفى وجودها بل وحتى فائدتها. وكان أصحاب مذهب الطاقة يفترضون أن المادة كلها مكونة من طاقة، ويرون أن مبدأ انحفاظ الطاقة هو العقيدة الأسمى في الطبيعة. ومما زاد من حدة النزاع ظهور المدرسة الوضعية (اليقينية) المنطقية في فيينا، التي كانت تحاول أن تُخرج من العلم كل الظواهر التي لا يمكن كشفها مباشرة بالحواس. وقد توقفت للأسف موهبة بولتزمان الفذة عن نشاطها حينما أقدم على الانتحار إبان فترة من الوهن العقلي الشديد قبل أن تلقى أفكاره القبول العام لدى الفيزيائيين.

والحقيقة أن الميكانيك الإحصائي يستمد صلاحيته، ككل الطرائق الإحصائية، من ضخامة عدد المكونات الفردية في أي جملة يعالجها؛ فكلما ازداد هذا العدد صغرت نسبة الخطأ المئوية في طرائق كهذه؛ فهذه النسبة تتناقص في الحقيقة كتناقص الجذر التربيعي لعدد أفراد الجملة. فمثلاً، إذا كانت الجملة مؤلفة من مليون فرد، أي كعدد سكان مدينة متوسطة الحجم، كان الخطأ النسبي في أي تحليل إحصائي من رتبة عُشْر في المئة؛ ولما كان عدد الجزيئات في أفضل خلاء نحصل عليه هو عدة آلاف من التريليونات في السنتيمتر المكعب فالنتائج التي نحصل عليها في الميكانيك الإحصائي موثوقة إلى حد بعيد.

ويكمن الغرض الفلسفي من الميكانيك الإحصائي والدافع إليه في أن الخواص الجهرية (العيانية) في جملةٍ مكونةٍ من الكثير من العناصر الفردية المجهرية لا بد أن يكون استنتاجها ممكناً من توزع هذه العناصر (أي الجسيمات) على مختلف حالات الطاقة الممكنة في الجملة؛ وقد كانت مساهمة جيبس في هذا الميدان وهذا النموذج من التحليل تهدف إلى تعيين حالة الجملة تعييناً دقيقاً بدلالة توزع جزيئات الجملة وذراتها على مختلف حالات الطاقة الممكنة. وقد طبق جيبس هذه الطريقة على الديناميك الكيمياوي وفي توازن جملة من الذرات والجزيئات المتبادلة التأثير.

وربما كان ج. و. جيبس J.W.Gibbs (1839-1903) أعظم عالم أمريكي في القرن التاسع



جوزيا ويلارد جيبس (1839-1903)

عشر، ولد في نيو ـــ هافن في ولاية كونيكتكت Connecticut، وكان الابن الوحيد لأستاذ الأدب في جامعة يِيل، وتلقى تعليمه الأول في مدرسة ثانوية محلية ثم انتسب إلى جامعة ييل في عام 1854، وبعد أن نال العديد من الجوائز وهو طالب في الكلية تابع بعد تخرجه أبحاثاً في الهندسة، وكانت الصفة العملية في رسالته بارزة جداً، وهي تصميم مجموعة من التروس أو المسننات. ونال شهادة الدكتوراه في الهندسة عام 1863، وكانت أول شهادة تمنح في هذا الفرع في الولايات المتحدة.

بدأ جيبس عمله الأكاديمي مدرساً مرشداً للطلبة ثم استفاد من ميراث متواضع في تمويل ثلاث سنوات قضاها في أوربا لدراسة الرياضيات والفيزياء. وقد توجه اهتمامه آنذاك إلى المبادئ التي تحكم آلة واط الحرارية، فقاده ذلك إلى الترموديناميك، وإلى البحث عن طريقة لحساب التوازن الحراري في سيرورة تفاعل كيمياوي. وفي عام 1871 عيّن أستاذاً للفيزياء الرياضية في جامعة ييل، ولكنه ظل تسع سنوات بدون رواتب إلى أن قدم جون هوبكنز منحة مجزية جعلت جامعة ييل تدفع لجيبس راتبه. وفيما عدا العطل الصيفية التي كان يقضيها جيبس في نيو إنْغلنْد أو في حضور بعض المؤتمرات العلمية العَرضية، فإنه لم يكن يغادر نيو هافن إلا نادراً، وكان يقضي وقته كله في المنزل

الذي ولد فيه متقاسماً مع اثنتين من أخواته المنزل والأعمال المنزلية اليومية فيه .

كانت نشرات جيبس العلمية رياضية محكمة ، إلا أنه كان يصعب على الكثيرين من زملائه فهمها بسبب أسلوبه المشتت ، ومع ذلك ، فقد كان أسلوبه في الكتابة منهجياً مدروساً ووثيقاً . وقد رأى في أول بحث نشره أن مفهوم الأنتروبية ، مثله مثل درجة الحرارة والضغط والحجم والطاقة ، لا يمكن الاستغناء عنه في دراسة الجمل الترموديناميكية ، في حين كان هناك الكثير من التشوش أو الالتباس عند العديد من الفيزيائيين الأوربيين بشأن مدلول هذا المفهوم ومعنى كلمة أنتروبية .

وكانت مساهمة جيبس الكبرى هي تطبيق مبادئ الترموديناميك التي طورها كارنو وجول وكلوزيوس وكلفن على التفاعلات الكيمياوية بأسلوب رياضي متين . أما عمله الرئيسي « عن توازن المواد غير المتجانسة » فقد وسع فيه مبادئ الترموديناميك لتشمل الجمل الكيمياوية والمرنة والكهرطيسية والكهركيمياوية ، غير أن هذا العمل لم يلق أي اهتمام يذكر ، مع أن مكسويل وبولتزمان كانا يقران ألمعيته ، ويعود السبب في ذلك جزئياً إلى أنها نشرت كلها في مجلة علمية مغمورة في كونيكتكت ، ولم يعرف جيبس في أوربا على نطاق واسع ولم يعترف رسمياً بإسهامه العلمي إلا بعد أن ترجم ولهلْم أوستفالْد بعض نشرات جيبس العلمية إلى اللغة الألمانية .

ولكي ندرس هذا العمل في أبسط صوره دعونا نعتبر غازاً مؤلفاً من ذرات فردية لا تتفاعل فيما بينها ، أي ما يسمى « غازاً جزيْئاته وحيدة الذرة » ، أو بعبارة أخرى ، كل جزيء منه مؤلف من ذرة واحدة فحسب وليس كالغاز الذي جزيئاته متعددة الذرات مثل Co_2 . ولندخل أيضاً مفهوم درجات حرية الجزيء المفرد إضافة إلى افتراض أن الجزيئات (الذرات) ليس لها بنية داخلية ، أو بعبارة أوضح ، ليس للبنية الداخلية دور في خواص الغاز الديناميكية أو الجهرية ، مما يكافىء باختصار فرضنا السابق بأن الجزيئات هي كرات صلبة تامة المرونة .

لنعرف الآن ، انطلاقاً من هذا التصور ، مفهوم درجات حرية الجزيء الفرد . إن هذا المفهوم يرتبط بعدد الحركات المستقلة التي يمكن أن نعزو إليها طاقة . ففي الحالة البسيطة التي افترضناها نرى أن لكل جزيء ثلاث درجات حرية فحسب ، لأنه يستطيع الحركة في أي اتجاه من اتجاهات أبعاد المكان الثلاثة المستقل أحدها عن الآخر والمتعامدة مثنى مثنى ، ويرافق حركته كمية من الطاقة الحركية في كل حالة ، ولنلاحظ هنا أن ما ذُكر لا يصلح في حالة جزيء مؤلف من ذرتين أو أكثر ، لأن الجزيئات المركبة يمكن أن يكون لها ، إضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية ، طاقة حركة دورانية وأخرى اهتزازية ، ويكون للجزيء بالتالي أكثر من ثلاث درجات حرية ، أو باختصار أن عدد درجات حرية الجزيء هو عدد أنماط طاقته ؛ فإذا كانت الجملة ، ولتكن غازاً مثلاً ، مؤلفة من عدد ضخم N من الجزيئات الوحيدة الذرة فإن عدد درجات حرية هذه المجموعة ، أو الجملة كما تدعى ، هو 3N .

ثم حين تكون هذه الجملة في حالة توازن فإن درجة حرارتها وطاقتها الداخلية تظلان ثابتتين بغض النظر عما يحدث في داخلها ، وهنا يحاول الميكانيك الإحصائي الإجابة عن السؤال التالي : ما هو احتمال حدوث أي حالة من حالات الجملة المختلفة علماً بأن هذا الاحتمال يتوقف ، كما هو واضح،على عدد الطرائق التي يمكن أن تتحقق بها هذه الحالة الخاصة نتيجة تبادل الجزيئات أوضاعها بمختلف الطرائق الممكنة .

لنفرض توخياً للدقة أننا وزعنا جميع الجزيئات على فئات مختلفة من الطاقة ، فوضعنا كل مجموعة من الجزيئات ، التي طاقاتها متقاربة جداً حتى لتكاد تكون متساوية ، في فئة واحدة . ويمكن أن نتصور هذا بأن نمثل كلّ فئة من فئات الطاقة بصندوق نرقمه برقم الفئة التي يمثلها . وهكذا نستطيع أن نرقم الصناديق بالأرقام الصحيحة 1 ,2 ,3 ... إلخ ، مع ملاحظة أن في الصندوق ذي الرقم 1 كل الجزيئات التي طاقتها قريبة جداً من وحدة طاقة واحدة (مهما تكن هذه الوحدة) ، وفي الصندوق ذي الرقم 2 كل الجزيئات التي طاقتها قريبة جداً من وحدتيّ طاقة وهكذا دواليك . وهنا نرى أن علينا أن نحرص على الإشارة إلى أنه لا يصح تصور هذه الصناديق بأنها أوعية حقيقية لها جدران محددة تشغل مكانها الفيزيائي الخاص بها (أي حجمها) فمثل هذا لا يصح لأن مختلف الجزيئات التي لها طاقة واحدة ، أو بالأحرى التي خُصّص لها صندوق طاقة واحد ، ستكون بوجه عام في أنحاء مختلفة من الحيز الحقيقي الذي يشغله الغاز . وهكذا ، يجب أن يقسم كل صندوق طاقة إلى العدد نفسه من الصناديق الجزئية الصغيرة التي يقع كل منها على مسافة مختلفة عن نقطة إسناد ، ولتكن مثلاً مركز الأسطوانة التي تحوي الغاز ، فيكون عدد الصناديق الجزئية الكلي التي يجب أن نستخدمها بهذه الطريقة مساوياً جداء عدد صناديق الطاقة في عدد الصناديق الجزئية المكانية التي يحويها كل منها . ولنلاحظ أن الحجم المكاني الذي يشغله كل صندوق طاقة هو بالتحديد الحجم الكلي الذي يشغله الغاز .

إن هذا الأسلوب الذي اتُّبع في تقسيم مجموعة الجسيمات إلى فئات جزئية تتألف كل منها من الجزيئات الموجودة في منطقة صغيرة من الفضاء الحقيقي والتي لها بتقريب جيد جداً الطاقة نفسها ، هو الأسلوب الأساسي في الميكانيك الإحصائي كله ، وقد تم تطبيقه بنجاح منقطع النظير على المجموعات الجزيئية والذرية (كالغازات مثلاً والبلورات والسوائل) ، وعلى مجموعات الفوتونات (أي الإشعاع) ، وعلى مجموعات الإلكترونات (الذرات والنجوم القزمة البيضاء) ، وعلى المنظومات السماوية (العناقيد الجرمية والمجرات) . وقد حسّن الفيزيائيون الرياضيون الأسلوب السابق ، أي تخصيص صناديق جزئية من الاندفاع والمكان معاً للعناصر الفردية في كل مجموعة ، بأن دمجوا مفهوم المكان بمفهوم الاندفاع وانتقلوا بذلك من ثلاثة أبعاد إلى ستة أبعاد ، وكان دافعهم إلى ذلك هو الفكرة التالية : لما كان المكانُ ثلاثيَّ الأبعاد ، (أي أن تحديد وضع أي جزيء من جزيئات الغاز في لحظة معينة يتطلب ثلاثة أعداد) ، وكان جزيءٌ كهذا يمكنه أن يتحرك بسرعة معينة في أي اتجاه من

الاتجاهات الثلاثة المستقلة في المكان (أي أن تحديد حركته (اندفاعه) يتطلب كذلك ثلاثة أعداد أخرى)، لذلك يجب معرفة ستة أعداد لتحديد حالة هذا الجزيء تحديداً كاملاً. وهذا ما دعا جيبس إلى تسمية هذا الفضاء الموسع «بالفضاء الطوري» للغاز، وهو كما يقال سداسي الأبعاد. فالتقسيم، كما شُرح في السابق، إلى صناديق جزئية صغيرة يعني تقسيم هذا الفضاء الطوري السداسي الأبعاد إلى خلايا صغيرة تمثل كل واحدة منها مقداراً معيناً من الاندفاع ومنطقة صغيرة من الفضاء. والفكرة الأساسية التي يقوم عليها الميكانيك الإحصائي والتي أكدتها التجارب تأكيداً تاماً، هي أن كلَّ حالة جهرية من حالات جملةٍ ما (ولتكن غازاً مثلاً)، هي نتيجة لحالة خاصة واحدة أو أكثر من الحالات المجهرية، أي نتيجة توزيع خاص لجسيمات (أو جزيئات) الجملة بين الخلايا المتاحة (الصناديق الجزئية) في الفضاء الطوري، وعلى هذا، فإن الحالة الجهرية التي توافق حينئذ فعلاً مجموعة معينة من المتغيرات الجهرية (الضغط والحجم ودرجة الحرارة) هي الحالة التي توافق أكبر عدد من الحالات المجهرية الممكنة (أي الإمكانات المختلفة لتوزيع الجسيمات على الخلايا).

ولا توجد فعلياً صعوبة تذكر في طريقة تعيين عدد الحالات المجهرية الأعظمي الذي يعين حالة جهرية خاصة، ويتضح ذلك بأن نعتبر صناديقنا الصغيرة مرة ثانية وأن نتصور أننا وزعنا عليها جميع جزيئات الغاز بالطريقة التي نريدها، ولكن مع مراعاة شرط أساسي هو أن تكون الطاقة الكلية، أي مجموع طاقات الجزيئات كلها، هو نفسه في هذا التوزيع أو ذاك. والآن، إن الشيء الوحيد الذي يجب أن يؤخذ بالحسبان في الرابطة بين الحالات المجهرية من جهة (أي طرائق توزيع الجزيئات كلها على خلايا فضاء الطور) والحالات الجهرية من جهة أخرى، هو عدد الجزيئات في كل خلية، ولا يهم أبداً أي جزيء من الجزيئات هو الذي استقر في خلية معينة، فمن الواضح إذاً أننا نستطيع أن نحصي الكثير من الحالات المجهرية المختلفة التي تقابل حالة جهرية بعينها، ويكفي لأجل ذلك أن نعيد ترتيب الجزيئات بين مختلف الخلايا من دون أن نغير عدد الجزيئات في أي خلية، فالمسألة إذاً هي مسألة تحليل ترافقي يمكن صياغتها بالسؤال التالي: تُرى أي توزيع من التوزيعات الممكنة للجزيئات بين مختلف الخلايا هو ذاك الذي يمكن أن يتكرر أكثر من غيره إذا بادلنا بين جزيئات الخلايا في كل توزيع وبكل الطرائق الممكنة من دون أن نغير عدد الجزيئات في كل خلية. ويمكن، وضوحاً، استخدام حسابات معينة لإيجاده، ولكن يجب التقيد دائماً بالشرطين التاليين: أن يظل دائماً مجموع أعداد الجزيئات الفردية في الخلايا المختلفة مساوياً عدد الجزيئات الكلي في الغاز، وأن يكون مجموع طاقات هذه الجزيئات مساوياً دائماً الطاقة الكلية للغاز.

وتسمى الصيغة التي تعطي هذا التوزيع في لغة الميكانيك الإحصائي «دالة التوزيع» وهي من أهم الاكتشافات التي تحققت في الفيزياء النظرية. وكان أول من استنتجها على النحو الذي ذكر سابقاً هو بولتزمان. أما صيغة مكسويل التي تعطي توزع السرعات الجزيئية في الغاز فهي تكافئها ولكن بصورة محدودة. وكان جيبس قد أدخل دالة التوزيع هذه في دراسته للديناميك الكيمياوي قبل

أن يجدها بولتزمان. وتتجلى أهمية دالة التوزيع في الفيزياء في أنها تمكّن الفيزيائي من حساب الخواص الجهرية المحسوسة الموجودة مثل الطاقة الداخلية والضغط والأنتروبية وغير ذلك، في أي جملة تتألف من عدد كبير من الجسيمات.

أصـــل نـظـريـة الـكـــم

«الآراء الراسخة، مثلها مثل الجدران الطينية، تقاوم أعتى الضربات، ومع أن الحجة الواضحة قد تستطيع بقوتها أحياناً أن تحدث بعض الأثر، إلا أن هذه الآراء، على الرغم من ذلك، تصمد وتتهرب من عدوها، أي من الحقيقة التي تبغي السيطرة عليها أو تعوقها».

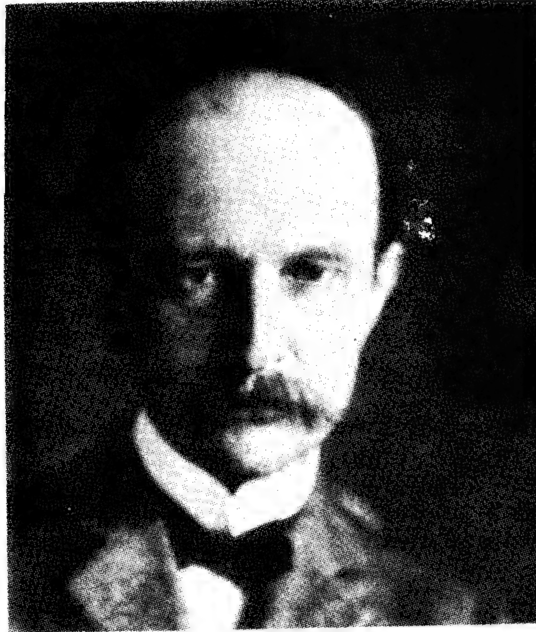
ــ جـون لــوك*

تبدأ نظرية الكم قصتها مع بلانك الذي بشرت دراساته الرائدة لطبيعة الإشعاع ببداية عصر جديد هزت اكتشافاته أعمق أسس الفيزياء التقليدية وأنهت بذلك العصر الذي سماه جيمس جينز «عصر العلم الميكانيكي». فوفقاً لرأي الفيزيائي الدانماركي نيلزبور «أحدثت نظرية الكم (أو نظرية بلانك) انقلاباً جذرياً في تفسير العلم للظواهر الطبيعية، لأن صورة العالم التي تكونت في ضوء الفيزياء الكمومية يجب أن يُنظر إليها على أنها تعميم مستقل عن الفيزياء التقليدية التي تضاهيها نظرية الكم بجمال تصورها وانسجام منطقها الداخلي»[1]. وكان فيرنر هايزنبرغ مكتشف مبدأ الارتياب كريماً أيضاً في ثنائه على عمل بلانك، فقد قال: «كان من الصعب على بلانك في ذلك الوقت أن يتنبأ بأن هذه النظرية، التي ناقضت صراحةً مبادئ الفيزياء المعروفة حتى ذلك الحين، ستتطور في مدى أقل من ثلاثين عاماً إلى نظرية في بنية الذرة لا تقل شأناً في سعة شمولها العلمي وبساطتها الرياضية عن المخطط التقليدي العام للفيزياء النظرية»[2]. وأخيراً فقد كتب أينشتاين بأن عمل بلانك «أكسب التقدم العلمي زخماً من أقوى ما أعطي له» حتى أنه كان يعتقد أن قوة هذا الزخم «ستدوم بدوام علم الفيزياء نفسه»[3].

* John Locke: فيلسوف إنكليزي (1632-1704) أنكر الأفكار الفطرية اللدنية وقال بأن مصدر معارفنا كلها هو الاختبار.

ولد ماكس ك. إ. ل. بلانك Max K.E.L.Planck في كييل Kiel في ألمانيا عام 1858، وكان والده أستاذاً للحقوق الدستورية في جامعة المدينة. وقد اشتُهر بمشاركته في وضع قانون بروسية المدني، ويقال أن بلانك ورث عن والده مواهبه الحقوقية بما فيها قدراته على حسن الاختيار بين عدد ضخم من البيّنات وتمييز الوقائع المناسبة من غير المناسبة[4]، ولكن لا جدال في أن صداقات أسرة بلانك هي التي دفعته إلى إيمانه بأن علم الفيزياء كان جزءاً هاماً من المعرفة الإنسانية وبأنه سيكون ذا أثر بالغ في تقرير مصير الجنس البشري.

وعندما بلغ بلانك التاسعة من العمر انتقلت الأُسرة إلى مونيخ كي يتمكن والده من الاضطلاع بوظيفة أستاذ في جامعتها. وفي مونيخ انتسب بلانك إلى ثانوية مكسمليان، حيث كان أول من أزكى فيه اهتمامه بالعلم أستاذ الرياضيات هيرمان مولّر Müller الذي كان وفقاً لما يقوله بلانك «معلماً بارعاً في جعل تلاميذه يتصورون قوانين الفيزياء ويفهمون معانيها»[5]. وكان مولر يستخدم صورة بنّاء يرفع بجهد كبير كتلة ضخمة من الحجر الثقيل لكي يثبت بأن الطاقة التي استخدمت في رفع هذه الكتلة لم تذهب هباءً، بل خُزنت في الكتلة إلى حين لأنها إذا انقلعت سقطت على الأرض. وقد ذُهل بلانك بمبدأ الانحفاظ هذا لأنه كان أول قانون فيزيائي عرف بأنه



ماكس كارل إرنست لدفيغ بلانك (1858-1947)

«مطلق يسري في كل زمان ومكان» ورأى بلانك منذئذ أن البحث عن قوانين الطبيعة المطلقة الأساسية هو أنبل عمل يمكن أن يقوم به أي عالم.

وقد تابع بلانك بعد نيله الشهادة الثانوية دراساته في جامعتي مونيخ وبرلين وهناك درس الفيزياء التجريبية والرياضيات، ولكن لم يُتح له أن يشهد دروس فيزيائيين ذوي شهرة عالمية إلا بعد ذهابه إلى برلين حيث استمع إلى هـ. فون هلمهولتز H.Von Helmholtz و غ. كيرشوف G.Kirchhoff الذي قال عنه بلانك أنه كان سبب اهتمامه الأول بالترموديناميك.

وكان بلانك يحس بالرهبة تجاه سمعة أساتذته المشهورين، ولكنه تغلب بعد ذلك على إعجابه. وقد اعترف في تاريخ حياته الذاتي العلمي بأن «محاضرات هؤلاء الرجال لم تعد علي بأي كسب ملموس»[6]، فهلمهولتز بحسب رأيه لم يكن يهيء محاضراته مطلقاً على نحو صحيح، وكان يعطي انطباعاً بأن «الصف كان يزعجه بقدر ما كان هو مزعجاً للصف»[6]. أما كيرشوف، فكان على العكس من ذلك؛ فقد ذكره بلانك بأنه أحد أولئك الذين يلقون محاضراتهم المهيأة بعناية حتى أنها كانت «تتلى وكأنها نص محفوظ جاف ورتيب»[7].

وهكذا درس بلانك، بسبب هذا المحيط الأكاديمي غير المثالي في برلين، كل الموضوعات التي كان يهتم بها دراسة شخصية، ثم عثر مصادفة على مؤلفات كلوزيوس في الترموديناميك «فترك أسلوبه الواضح وتفكيره النيّر أثراً عظيماً»[7] في بلانك، وتحددت منذ ذلك اليوم خطة مجرى حياته العلمية حتى النهاية، كما ساعده ذلك على إذكاء ما كان قد ضعف من حماسه للعلم، فكان موضوع رسالته للدكتوراه التي تقدم بها في مونيخ عام 1879 هو دراسة قانون الترموديناميك الثاني.

غير أن عمله لم يخلّف سوى أثر ضئيل في أساتذته (وخالجه شعور بأن هلمهُولتز لم يزعج نفسه أبداً بقراءته)، ومع ذلك تابع دراساته للأنتروبية مدفوعاً بإيمانه أنه ما من خاصة، سوى الطاقة، تفوقها بالأهمية في الجمل الفيزيائية فتوصل بعد أن أصبح محاضراً جامعياً في مونيخ إلى عدة نظريات مفيدة في دراساته لمزائج الغازات، ولكنه وجد، لسوء طالعه، أن هذه النظريات نفسها كان قد سبقه إلى إعلانها الفيزيائي الأمريكي جوزياجيبس، لذلك لم يلق اعترافاً بمجهوده[8].

وفي عام 1885 قبل بلانك تعيينه أستاذاً مساعداً للفيزياء النظرية في جامعة كييل، فشعر بأنه سعيد الحظ نظراً لندرة مراكز الفيزياء النظرية في الجامعات في ذلك الوقت، ثم بوجه خاص، لأن هذا التعيين مكّنه من الابتعاد عن منزل والده[9] فأنهى هناك بعد انتقاله نشرة علمية بعنوان «طبيعة الطاقة» نال عليها أخيراً الجائزة الثانية في عام 1887 من كلية الفلسفة في غوتنْغن. وعندئذ كتب بلانك سلسلة من الرسائل الاختصاصية التي كانت تعالج مبادئ الأنتروبية ولا سيما ارتباطها بقوانين التفاعلات الكيمياوية. وفي عام 1889 ذهب إلى جامعة برلين ليشغل مركز أستاذه القديم

كيرشوف الذي كان قد توفي حديثاً . ولم يكتف بلانك هناك بإقامة صداقات دائمة مع الفيزيائيين بمن فيهم هلمهولتز بل بدأ بتوسيع صلات المراسلة مع فيزيائيين مثل ولْهلْم أوستفالد فيما يتصل بتقسيم هذا الأخير للطاقة إلى ثلاثة أنماط تقابل أبعاد المكان الثلاثة (الأمر الذي لم يكن معقولاً في رأي بلانك) . كما تورط في الخلاف الدائر حول دقة المثال الذي كان معظم فيزيائيي ذلك العهد يشبهون فيه انتقال الحرارة من درجة مرتفعة إلى درجة منخفضة بسقوط الحجر من مكان مرتفع إلى مكان منخفض ، فكان بلانك ينتقد القائلين بمذهب الطاقة ، الذين كانوا يؤيدون وجهة النظر هذه ، ومما قاله في ذلك :

« لا تأخذ هذه النظرية بعين الاعتبار ذلك الواقع الأساسي ، وهو أن الثقل يمكن أن يرتفع مثلما يسقط ، وأن النواس يصل إلى سرعته العظمى في اللحظة نفسها التي يصل فيها إلى أخفض وضع له ، وأنه لذلك ينتقل بسبب عطالته إلى الطرف الآخر ماراً بوضع التوازن ، في حين أن انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد يضعف كلما نقص الفرق في درجة الحرارة بين الجسمين ، فليس في ذلك ، وضوحاً ، شيء مشابه للانتقال ، بسبب نوعٍ من العطالة ، بعد وضع التوازن الحراري »[10] .

وقد تثبطت عزيمة بلانك كثيراً من رد زملائه غير المناسب على انتقاداته لهذا التشابه ، ولكنه اعترف بأنه « كان من المستحيل حقاً أن يصغي إليه أحد ، لأنه كان يجابه نفوذ رجال مثل أوستفالد وهِلْم وماخ[11] . وعلى الرغم من أنه ثبت أخيراً أنه كان على حق في شكه بصحة هذا التشابه ، فإنه لم يرضَ بأن يدعي لنفسه حقاً في ذلك لأن وجهة نظره قُبلت أخيراً ، لا لشيء إلا لأن النظرية الذرية التي طرحها بولتزمان فيما بعد قد شملتها ، وقد وقف بلانك إلى جانب بولتزمان في معركته المستمرة مع أوستفالد ، ولكن بولتزمان لم يكن يستسيغ هذا الدعم لأنه « كان يعرف جيداً أن وجهة نظري كانت تختلف اختلافاً أساسياً عن وجهة نظره »[12] ، إذ لم يكن بلانك يعتقد كثيراً بالنظرية الذرية التي كانت أساس أبحاث بولتزمان لأنه كان يرى في ذلك الوقت أن « مبدأ تزايد الانتروبية ليس أقل صلاحية من مبدأ انحفاظ الطاقة نفسه ، في حين أن بولتزمان كان يرى أن مبدأ تزايد الأنتروبية مجرد قانون احتمالي لا غير ، أو أنه بعبارة أخرى ، مبدأ يمكن أن يكون له شذوذات »[12] . وعند انتصار بولتزمان في النهاية والتسليم العام بوجود فروق بين انتقال الحرارة والعمليات الميكانيكية الصرفة ، لم يستطع بلانك إلا أن يلاحظ بسخرية «أن الحقيقة العلمية الجديدة لا تنتصر نتيجة لاقناع خصومها وجعلهم يبصرون نور الحقيقة ، بل لأن خصومها يموتون أخيراً ويظهر مكانهم جيل جديد يألف هذه الحقيقة »[13] .

وكان الدافع الذي أثار اهتمام بلانك بالإشعاع هو اليقين المتزايد بعجز الفيزياء التقليدية عن تفسير النتائج التي أكدتها التجارب ، إلا أن عمله لم يستهدف الضوء بل الترموديناميك ، وانبثق عن قياسات الإشعاع في طيف اصدار الجسم الأسود .

وعلى الرغم من معاني التكريم العديدة التي تلت إدخاله نظرية الكم، بما فيها جائزة نوبل للفيزياء عام 1919، فإن مركزه المأمون في دنيا العلم لم يحمه من فواجع حياته الشخصية أو من سعير حربين عالميتين، إذ توفيت بنتاه بعد زواجهما بقليل، وهلك ابنه البكر كارل في معركة فردان في عام 1916 في حين أن ابنه الثاني إروين قتل في كانون الثاني / يناير 1945 إبان حكم الإرهاب، وتهدم منزله في إحدى الغارات الجوية، كما قضى هو نفسه مرة عدة ساعات مطموراً تحت أنقاض ملجأ من الغارات الجوية. وفي أيار / مايو من عام 1945 نقلته القوات الأمريكية المتقدمة من ملكيته في روغتز Rogätz على جبال الألب، التي كانت آنذاك منطقة حربية، إلى غوتنْغن[14]، ثم وافته المنية عام 1947 عن 89 عاماً.

ولم يتخل بلانك قط، على الرغم من فجيعته بأولاده، عن هدوئه واتزانه؛ فكانت ذكرياته المؤلمة تبدو كأنها «تثير فيه كآبة هي في أعماق طبيعته، فتُكْسبها تأججاً شديداً هو أقرب لأن يكون باطنياً غامضاً»[15]. غير أن بلانك كان يعالج ألمه بانصرافه إلى عمله بكل تفان، فظل على هذا النحو «رجلاً عملياً اجتماعياً بكل معنى الكلمة، ورجلاً عصرياً في مظهره ولباسه، إضافة إلى أنه كان رياضياً تسلق قمة يُنْغ فْراو Jungfrau ليحيي عيد ميلاده الثاني والسبعين»[16]. وكان مثل أينشتاين موسيقياً ماهراً يفضل بتْهوفن. وتعكس ذلك إنجازاته العلمية، فهي ولا شك من خيال فنان لأن بحثه عن التناسق الكامن في الطبيعة مكّنه من أن يبني وبمفرده جسراً فوق الهوة الفاصلة بين عالم نيوتن التقليدي وعالم فيزياء الكم ونظرية النسبية الحديث، وهذا ما سنتطرق إليه الآن لنروي قصة اكتشافه العظيم.

في 19 تشرين الأول / أكتوبر من عام 1900 تقدم الفيزيائي الرياضي الألماني ماكس بلانك وله من العمر 42 عاماً بصيغة جديدة للإشعاع إلى الجمعية الفيزيائية في برلين أشعل بها بعد ذلك ثورة في العلم. وكان ما تقدم به بلانك يشير في الوقت نفسه إلى نهاية عصر يدعى الآن عصر الفيزياء التقليدية، وإلى بداية عصر جديد في تفكير الإنسان ونظرته إلى قوانين الطبيعة. وعلى الرغم من أن سنوات معدودة كان يجب أن تنقضي قبل أن يقبل العلماء مفهوم الكم بأنه أكثر من مجرد «فرضية مساعدة» يمكن أن تُلغَى في النهاية عند ظهور النظرية المناسبة، فإن بلانك كان على وعي تام بأهمية اكتشافه، إذ قال لابنه إروين وهو يسير معه في نزهة في ذلك اليوم نفسه «لقد حققت اليوم اكتشافاً يعادل في أهميته اكتشاف نيوتن». ثم توسع بلانك بعد شهرين في شرح اكتشافه في أحد اجتماعات الجمعية الفيزيائية الألمانية، وأعلن أنه يعني «استكمام (تكمية) Quantization الفعل» وأن كل فعل هو لهذا السبب مضاعفات تامة من «كم فعل أولي» ــ أشار إليه بلانك بالحرف h (ثابت بلانك الشهير) ــ يجب أن يحتل مكانه في معرض ثوابت الطبيعة الكبير مع ثابت الجاذبية G وسرعة الضوء في الخلاء c، وثابت بولتزمان K، ووحدة الشحنة الكهربائية q.

ولما كان استكمام الفعل قانوناً أساسياً في الطبيعة ، فلا بد أن يدخل ثابت بلانك ، شأنه شأن سرعة الضوء ، في كل قوانين الطبيعة ، مما يعني أن قانون نيوتن الثاني الذي يربط معدل تغير حالة حركة الجسم بالقوى المؤثرة فيه ، هو قانون غير صحيح لأنه لا يحوي h ، وقد أدى السعي إلى إصلاحه ، كما سنرى لكي يتفق مع استكمام الفعل ، إلى ما يُعرف الآن بميكانيك الكم .

ولما كانت نظرية الكم تختلف اختلافاً كبيراً في مفاهيمها عن النظرية التقليدية ، فلا بد أن يتساءل المرء كيف يمكن لمفهوم ثوري مثل الاستكمام الذي يؤدي إلى وصف ظواهر الطبيعة وصفاً تقطعياً في أساسه ، أن ينبثق من نظريات تقليدية وصفها للظواهر متصل ؛ بل لا بد أن يبلغ هذا العجب أقصاه حين يتأمل المرء في وضع الفيزياء عندما كان بلانك منساقاً بعكس رغبته وعكس ما كان يظن أنه الأفضل ، إلى فرض وجود كم الفعل كي يشرح به خواص إشعاع « الجسم الأسود » الغريبة . غير أن الفيزياء التقليدية بدت في أوج إنجازاتها في وضع منيع لأن قوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الجاذبية كانت ذات دقة رائعة ، إذ إن وصف حركات الكواكب وحركة الأجسام على سطح الأرض كان يبدو كاملاً ، بل إن هذه القوانين فسرت حركة ارتفاع المد وانخفاض الجزر ؛ هذا من جهة ، ومن جهة أخرى فقد حققت نظرية مكسويل الكهرطيسية الرائعة للضوء في مجال الإشعاع ، كما صيغت في معادلات مكسويل الشهيرة للحقل الكهرطيسي ، ما حققه نيوتن عامة لحركات الأجسام المادية ؛ ثم توسعت هذه المثنوية إلى ثلاثية رائعة عند اكتشاف قانوني الترموديناميك ، أي قانون انحفاظ الطاقة وقانون الأنتروبية .

ففي العقد الأخير من القرن التاسع عشر ، حين كان يُدفع بلانك خطوة فخطوة نحو نظرية الكم ، كانت الفيزياء تبدو فرعاً من المعرفة مكتملاً خالياً من الفجوات التي تحتاج إلى نظريات جديدة تملأها ولا سيما نظرية في الانقطاع ، ولكن ذوي النزعة النقدية من الفيزيائيين الذي تفحصوا الوقائع بدقة في ذلك الوقت أظهروا أماكن الضعف في هذا البناء الجميل الذي شيّده نيوتن ومكسويل ومن تبعهم ، فقد وجدوا أن هناك مجموعتين من الظواهر لم يتمكنوا من تفسيرها ، وتتألف أولاهما من النتائج السلبية التي توصلت إليها تجارب ميكلسون ومورلي (وأعني بها عدم قدرتهم على اكتشاف حركة الأرض بملاحظتهم أشعة الضوء التي تنتشر في اتجاهين مختلفين) إضافة إلى تقدم حضيض مدار عطارد المخالف للتنبؤات النيوتنية . وقد حلت هاتان المعضلتان بعد ذلك بنظريتيْ النسبية الخاصة والعامة ، اللتين سندرسهما في الفصل الخامس عشر . أما المجموعة الثانية فتتألف من تعارض القيم المرصودة مع القيم المحسوبة في الحالات التالية : الحرارة النوعية للغازات ، خواص الإشعاع الصادر من ثقب صغير في جدار فرن (جسم أسود أو إشعاع حراري) ، الخطوط المضيئة المنفصلة في طيف الذرات ، وقد فُسرت هذه الظواهر الغامضة كلها بنظرية الكم .

وكان مكسويل قد بين من قبْل في عام 1858 أن نظريته الحركية في الغازات تؤدي إلى تناقض

واضح بين قيم الحرارة النوعية المحسوبة للغازات والقيم المرصودة (أي المقيسة)؛ فقد كانت نظرية مكسويل تعامل الغاز بصفته مكوناً من جسيمات تحت مجهرية (جزيئات) تتحرك عشوائياً محكومة بقوانين نيوتن في الحركة، فبيَّن باستخدام هذا النموذج أن درجة حرارة الغاز المطلقة تتعين بوسطي طاقة حركة أي جزيء من الغاز (درجة الحرارة المطلقة تتناسب في الحقيقة مع هذه الطاقة)؛ وعلى هذا فإن الطاقة الكلية المحتواة في الغاز هي جداء هذه القيمة الوسطى للطاقة الحركية في عدد جزيئات الغاز. لذلك إذا لم تتفق إحدىٰ خواص الغاز المقيسة مع الخاصة نفسها المحسوبة من النظرية الحركية، فإن قوانين نيوتن تصبح عندئذ موضع شبهة، وهذا بالتحديد هو الوضع فيما يتصل بالحرارة النوعية في الغازات.

وتعرَّف الحرارة النوعية لمادة ما بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من هذه المادة درجة مئوية واحدة (وهذه الكمية هي حريرة واحدة في حالة الماء). ويتضح لنا من النظرية الحركية أن زيادة درجة الحرارة تعني زيادة وسطي الطاقة الحركية لجزيءٍ ما، فكمية الحرارة اللازمة لزيادة درجة الحرارة زيادة معينة يجب أن تكون وفقاً للنظرية الحركية هي نفسها لجميع درجات الحرارة، ولكن هذه النتيجة تناقض المشاهدات التي بينت أن حرارة الغاز النوعية تتناقص كلما ازداد الغاز برودة. وقد أشار مكسويل إلى هذه النتيجة ووصفها بأنها عيب جدي في النظرية، إذ قال: «إني أرى أن هذه النتيجة هي أكبر صعوبة لا تزال تلاقيها النظرية الجزيئية». وهكذا أصبحت صلاحية قوانين نيوتن في الحركة موضع شبهة أكثر مما كانت عليه منذ قرن (قبل مكسويل)، لأن النظرية الحركية التي انبثق عنها هذا التناقض، هي نتيجة مباشرة لقوانين الحركة.

أما الصعوبة الأخرى التي واجهت الفيزياء التقليدية فقد انكشفت قرب نهاية القرن التاسع عشر، عندما دُرست خواص الإشعاع الصادر عن الأجسام الحارة، ففي ذلك الحين كان المطياف الذي يفرّق الإشعاع إلى مركباته من أطوال الموجات (أو من التواترات أو الألوان) يستخدم على نطاق واسع لدراسة الإشعاع المنبعث من الأجسام الصلبة الحارة ومن النجوم. وكان معروفاً أن طيف الضوء الصادر عن غاز متوهج (ضوء متفلور) والذي يكشف المطياف ألوانه أو أطوال موجاته يتألف من مجموعة منفصلة من الخطوط الدقيقة الملونة الساطعة (لكل نوع من الغاز مجموعة مختلفة). أما طيف الضوء الصادر عن جسم صلب متوهج (كالسلك الصغير الحار مثلاً في مصباح كهربائي)، فهو سلسلة متصلة من الألوان، من الأحمر حتى البنفسجي، لذلك أثيرت عن هذين النوعين من الطيف أسئلة عديدة حاول الفيزيائيون استنتاج الأجوبة عنها من القوانين الأساسية في الفيزياء التي كانت معروفة في ذلك الزمان.

ولما كان يبدو أن طبيعة الإشعاع الصادر عن جسم صلب حار،أو عن غاز متوهج،لا تتعلق فحسب بطبيعة الجسم (غازاً كان أم صلباً) بل تتعلق أيضاً بدرجة حرارته، وكان معروفاً أيضاً أن

الإشعاع، وفقاً لنظرية مكسويل الكهرطيسي هو ظاهرة إشعاعية، لذلك كان الفيزيائيون مقتنعين بأن تطبيق قوانين الكهرباء والمغنطيسية وقوانين الترموديناميك بصورة صحيحة على الأجسام الحارة والغازات المتوهجة سيؤدي في النتيجة إلى أجوبة عن هذه الأسئلة التي طرحتها المشاهدات. وكانت الأسئلة التي أُثيرت على نوعين: (1) كيف تولّد المادة المحسوسة إشعاعاً كهرطيسياً وتصدره وتمتصه مع أنها حيادية كهربائياً؟. (2) لماذا يختلف الإشعاع الصادر عن غاز متوهج اختلافاً واسعاً عن الإشعاع الصادر عن جسم حار، ثم ما العلاقة بين خواص إشعاع الجسم الحار ودرجة حرارة الجسم؟. وكان الأمل في الإجابة عن أسئلة من النوع الأول في هذه الفترة التاريخية ضعيفاً جداً، لأن ما كان يُعرف عن المكوّنات الكهربائية للمادة لا يتجاوز ما اكتشفه فرادي أثناء دراساته في الكيمياء الكهربائية والكهرطيسية إلا قليلاً جداً. صحيح أن الفيزيائي النظري الهولندي العظيم هـ. أ. لورنتز كان قد بدأ بتطوير «نظرية إلكترونية في المادة»، ولكن بنية الذرة كانت لا تزال سراً دفيناً، فكان من غير المعقول في ذلك الوقت رسم صورة مفصلة عن إصدار الذرات للاشعة وامتصاصها لها، أما إيجاد علاقة عامة بين الخواص الحرارية للجسم والإشعاع الذي يصدره أو يمتصه فكان يبدو هدفاً قريب المنال لذلك سلك بلانك طريق هذا الهدف.

ولكن هذا لا يعني أن بلانك هو الوحيد الذي بدأ بهذا البحث الطليعي الرائد الذي أدى إلى نظرية الكم، فأستاذه روبرت كيرشوف كان في 1860 قد استنتج من الترموديناميك قانوناً مهماً في الإشعاع يربط معدل إصدار الإشعاع من سنتيمتر مربع واحد من سطح الجسم وهو في درجة حرارة معينة مع معدل امتصاصه لهذا الإشعاع. وكان كيرشوف قد ميَّز بكل وضوح بين السطوح التي تعكس الإشعاع بسهولة والسطوح التي تمتصه، ذلك لأنه من الواضح أن هاتين الخاصتين تستبعد إحداهما الأخرى، بمعنى أنه إذا امتص السطح نسبة كبيرة من الإشعاع الذي يسقط عليه، فإنه لا يستطيع عندئذ أن يعكس سوى النسبة الصغيرة التي لم يمتصها، والعكس بالعكس. فالحالتان الحديتان هما حالة العاكس التام الذي يعكس جميع أطوال الموجات التي ترد إليه، وهو بالتالي لا يمتص شيئاً أبداً، وحالة الماص التام الذي يمتص جميع أطوال الموجات التي ترد إليه. ويسمى العاكس التام «الجسم الأبيض»، كما يسمى الماص التام «الجسم الأسود»، والثاني هو الذي كان له دور مهم جداً في نظرية الكم من الناحية النظرية. ولا شك أنه لا يوجد عملياً عاكس تام أو ماص تام، لأن كل السطوح تمتص الإشعاع وتعكسه في الوقت نفسه.

ولا بد لنا قبل أن نشرح طبيعة قانون كيرشوف شرحاً وافياً من أن نعرّف أيضاً مفهوم إصدار الإشعاع (أو إصدارية السطح)، مع ملاحظة أن الأجسام كلها، مثلما هي عاكسة ماصة معاً للإشعاع، فإنها أيضاً تصدر الإشعاع بنسب معينة، أو باختصار إنها تشع. وهنا لا بد من أن نكون حذرين لكي لا نخلط بين الإصدار والانعكاس، فالثاني هو عملية يرتد فيها الإشعاع عن سطح

الجسم من دون أن يتغير أبداً (فالضوء الأحمرُ يظل أحمرَ والأزرقُ أزرقَ، ...) وهكذا فإن العاكس التام لا يمكن أن يصدر أي إشعاع؛ أما السطح الماص فهو يصدر الإشعاع (إلى جانب كونه ماصاً)، ولكن الإشعاع الذي يصدره يختلف كل الاختلاف عن الإشعاع الذي يمتصه.

ولكي نجعل التمييز بين الانعكاس والإصدار واضحاً كل الوضوح، دعونا نعتبر ضوءاً له طول موجة معين (أشعة حمراء مثلاً)، ولنفرض أنها اصطدمت بسطح عاكس تام وأن أشعة من النوع نفسه اصطدمت بماص تام. ففي الحالة الأولى ينعكس الضوء ويظل على حاله تماماً عند مغادرته السطح مثلما كان عندما سقط عليه فلا ينتقل شيء من طاقته إلى السطح، فتبقى درجة حرارة السطح بالتالي على حالها من دون تغيير، ومن ثم لا يتأثر معدل إصداره للطاقة بالأشعة الساقطة عليه. ولنلاحظ أيضاً أن العاكس التام يعكس الأشعة بنسبةٍ تساوي بالتحديد نسبة استقباله لها. أما قصة هذا الإشعاع نفسه حين يصطدم بسطح ماص تام (أعني بجسم أسود)، فتختلف مثلما تختلف قصة هذا السطح نفسه، ذلك لأن الأشعة نفسها تختفي كلياً في هذه الحالة؛ فهي، إن صح التعبير، تصبح جزءاً من السطح الذي ترتفع بالتالي درجة حرارته (حفظ الطاقة أو قانون الترموديناميك الأول)، فيؤدي ذلك إلى جعل السطح يصدر أو يشع طاقة بسرعة أكبر مما كان يشع منها قبل أن تصطدم به حزمة الأشعة الحمراء نفسها التي امتصها في تلك المدة من الزمن؛ ولكن الإشعاع الصادر يختلف تماماً عن الإشعاع الوارد، فهو خليط من موجات أطوالها ذات تدرج مستمر وطاقتها الكلية تساوي طاقة الحزمة الحمراء الواردة؛ ولكن هناك وضوحاً نسبة صغيرة فحسب من هذا الإشعاع الكلي الصادر، هي أمواج طولها يساوي طول موجة الضوء الأحمر الوارد؛ أو بعبارة أخرى، ينثر السطح الماص الإشعاع الساقط عليه على صورة طيف متصل.

وهنا يبرز مباشرة السؤال التالي المتعلق بإصدار أي سطح من السطوح للإشعاع وامتصاصه له: ما العلاقة بين كمية الإشعاع (أو شدته أو سطوعه) من لون معين، أو ذي طول موجة معين، الذي يصدره سنتيمتر مربع واحد من السطح عند درجة حرارة معينة في وحدة الزمن؟ لقد استنتج الفيزيائي الألماني كيرشوف في عام 1860، جواباً عن هذا السؤال، من قوانين الترموديناميك، هو التالي: إذا قسمنا معدل الإشعاع الصادر بلون معين عن وحدة المساحة من أي سطح كان عند درجة حرارة معينة، على معدّل امتصاص وحدة السطوح نفسها للإشعاع ذي اللون نفسه وعند درجة الحرارة نفسها، فإننا نجد أن حاصل القسمة ثابت كوني (أي أنه هو نفسه لجميع السطوح)، ولا يتعلق إلا بطول موجة الإشعاع وبدرجة حرارة السطح، (وهذا هو قانون كيرشوف)، أي لا علاقة لهذه النسبة بنوع السطح على الإطلاق. ولما كانت نسبة امتصاص الجسم الأسود لجميع أطوال الموجات هي الواحد (لأنه يمتصها كلها)، فالثابت الكوني إذاً هو نفسه معدل إصدار الجسم الأسود للإشعاع الذي له طول موجة معين! فالمسألة المتعلقة بالنسبة

بين إصدار وامتصاص إشعاع ذي طول موجة معين من سنتيمتر مربع واحد من أي سطح كان، آلت كلها إلى سؤال يتعلق بطبيعة الإشعاع الصادر عن الجسم الأسود وهو في درجة حرارة معينة. وهكذا أصبحت المهمة التي أخذها بلانك على عاتقه هي أن يستنتج من قوانين الفيزياء المعروفة في زمانه (أي قوانين الترموديناميك والكهرطيسية) صيغة رياضية تعطي القيمة الصحيحة لشدة كل لون (طول موجته محدَّد) في الإشعاع الكلي الصادر في كل ثانية عن سنتيمتر مربع واحد من سطح الجسم الأسود حين يكون في درجة حرارة معينة.

ومع أن تجارب حسنة الإعداد جعلت من الممكن الحصول على بيانات تجريبية، إلا أنها جميعاً لا تُغني عن جسم أسود حقيقي. ولما كان لا وجود لجسم أسود كامل، لذلك لا بد من أن نبحث عن وسيلة مصطنعة يمكن أن نجعلها قريبة بقدر ما نريد من الجسم الأسود الحقيقي؛ وهذه مسألة كان حلها بسيطاً: فالوعاء المغلق الذي جوانبه معتمة (غير شفافة البتة) إذا أحدث ثقب صغير في جداره فإن هذا الثقب يتصرف تصرف جسم أسود لأن أي إشعاع يدخل منه إلى الوعاء لن تتاح له سوى فرصة ضئيلة جداً لكي يخرج منه، إذ يواصل هذا الإشعاع سلسلة انعكاسات داخل جوف الوعاء إلى أن يُمتص كلياً. وخير مثال على هذه الظاهرة هو القسم الظاهر من عين الإنسان، لأن بؤبؤ العين هو في الحقيقة فتحة ضئيلة في قرنية العين تبدو شديدة السواد، فإذا وجد ثقب صغير من النوع الموصوف أعلاه، فلا بد أن يمتص عندئذ كل إشعاع يصل إليه (أي يمتصه كما يفعل الجسم الأسود)، فلا بد بالتالي أن يشع كما يشع الجسم الأسود.

لنتخيل حاوياً جدرانه معتمة (كالفرن مثلاً) ودرجة حرارتها معينة وتشع طاقة إلى داخل الحاوي، فإذا احتفظت الجدران بدرجة حرارة ثابتة فإن الطاقة الإشعاعية تبقى عندئذ ثابتة في الحاوي وتظل في حالة توازن مع الجدران، بمعنى أن المعدل الذي تستعيد به الجدران امتصاص الإشعاع الموجود في الحاوي يساوي بالتحديد المعدل الذي تشع به الجدران الطاقة ثانية إلى الحاوي، وعندئذ نستطيع القول إن درجة حرارة الإشعاع في الحاوي تساوي درجة حرارة جدرانه. وقد جرت العادة على أن يطلق على هذا الإشعاع في الجوف صفة «الإشعاع الحراري»؛ فإذا ثقبنا جدار الحاوي ثقباً ضئيلاً أصبح الإشعاع المتدفق منه إشعاعَ «جسم أسود» درجة حرارته هي درجة حرارة السطح الداخلي لجدران الفرن.

وهنا برز عدد من الأسئلة تتعلق بهذا الإشعاع جابهت مباشرة المجربين والنظريين معاً: (1) كم من الإشعاع من مختلف الأنواع (أي من كل الأطوال الموجية ممتزجة) تصدر في الثانية عن ثقب مساحته 1 سم^2 مثقوب في جدار فرن عند درجة حرارة معينة؟. (2) ما طول موجة اللون الأكثر شدة الموافق لدرجة حرارة الفرن (أي اللون الذي يتركز فيه الإشعاع أكثر من أي لون آخر)؟. (3) كيف تتعلق شدة إشعاعٍ ذي طول موجة معين بطول موجته وبدرجة حرارة الفرن (أعني هل

ترتبط شدة إشعاع ذي طول موجة معين مع طول الموجة هذا ومع درجة الحرارة بصيغة جبرية بسيطة.

لقد أجاب المجربون عن ذلك بسهولة، لأن كل ما كان عليهم عمله للإجابة عن السؤال الأول بالاختبار الحسي هو تجميع الإشعاع كله (أي كل الأطوال الموجية ممتزجة) المنبعث في ثانية واحدة من ثقب مساحته 1 سم^2 على مقياس الإشعاع. أما للإجابة عن السؤالين الآخرَيْن فقد استخدموا مطيافاً لتبديد الإشعاع إلى مختلف ألوانه (أطواله الموجية) الفردية، أي تكوين طيفه المتصل، ثم قاسوا شدات الألوان واحداً تلو الآخر. وهكذا كانت نتائج المجربين هادية للنظريين، فقد وضعت بين أيديهم ثلاث روائز مختلفة يمكن أن يختبروا بها نماذجهم النظرية أو استنتاجاتهم. وكان على هؤلاء الفيزيائيين النظريين أن يبحثوا عن قانون شامل لإشعاع الجسم الأسود يتضمن أجوبة عن هذه الأسئلة كافة، ولكن لم يكن لديهم في ذلك الزمن ما يرشدهم في بحثهم هذا سوى قوانين الحركة التقليدية (الميكانيك النيوتني) وقانوني الترموديناميك ونظرية مكسويل الكهرطيسية في الإشعاع. غير أن هذا البحث كان عديم الجدوى على الرغم من أنه قد تم الحصول من الترموديناميك على القانون الصحيح الذي يعطي الطاقة الكاملة (الإشعاع) المبثوثة في جميع الألوان حين يكون الفرن في درجة حرارة معينة ولكن هذا كل ما كان باستطاعة الفيزياء التقليدية أن تقدمه في هذا المجال، لذلك كانت الفيزياء بحاجة إلى مبدأ أساسي ومفهوم جديد كل الجدة، فأمدهم بلانك بنظرية الكم هذه التي سنرى في الفصل القادم كيف توصل إليها، ولكننا سنستعرض أولاً بعض الأفكار المهمة الأساسية تمهيداً لذلك.

ذكرنا من قبْل أن بلانك قد أدخل مفهوم كَم الفعل الذي أصبح أساسياً لجميع تطورات نظرية الكم التي تلت ذلك، فيهمنا إذاً أن نفهم ما معنى «فعل» في الفيزياء، وكيف جيء به إليها وما أصله. لذلك يجب أن نعود، للإجابة عن هذا السؤال، إلى فلكي رياضي من القرن التاسع عشر هو ب. ل. م. دي موبرتوي P.L.M.de Maupertuis الذي كان أول من أدخل مبدأ الفعل الأصغري باسم «قاعدة الاقتصاد»، وهي قاعدة يجب أن يتمشى معها كل فعل في الطبيعة، ويتطلب فهمها تعريف مفهوم الفعل عند موبرتوي. وقد سبق لنا أن عالجنا هذا المفهوم بالتفصيل في الفصل الثامن لصلته بأعمال هاملتون في الفيزياء التي سنثبت اتصالها بعمل بلانك بعد التذكير بهذا المفهوم. فلنعتبر، لأجل ذلك، جسيْماً ذا كتلة معينة يتحرك على مساره مسافة ضئيلة بسرعة معينة، فيكون جداء كتلة هذا الجسيم في سرعته في طول المسافة الضئيلة التي سارها هو «فعل موبرتوي» لهذا الجسيم في هذه المسافة. وينص مبدأ الفعل الأصغري أنه إذا جُمعت كل هذه الأجزاء الصغيرة من الفعل على طول مسار الجسيم بأكمله، فإن مجموعها يجب أن يكون على طول المسار الفعلي للجسيم أصغر من هذا المجموع على طول أي منحنٍ (أو مسار) آخر يمكن أن نتخيله واصلاً بين نقطة بداية حركة الجسيم ونقطة وصوله.

والآن، بعد أن عرّفنا مفهوم الفعل، علينا أن نبين كيف ولماذا يقوم هذا الفعل بدور هام في عمل بلانك الرائد، ولماذا استكمَّه بلانك لكي يحصل على صيغة الجسم الأسود الصحيحة للإشعاع. غير أن هذه النقاط سندرسها بالتفصيل في الفصل القادم، لهذا سنقصر دراستنا هنا على إطلالة مختصرة لنبين ما دفع بلانك إلى هذه الدراسة، إذ طبق قوانين الترموديناميك على تحليل مسألة الإشعاع لسببين: (1) لأنه كان مثل معظم الفيزيائيين الألمان يرتاح للترموديناميك أكثر مما يرتاح لكهرطيسية مكسويل التي لم تتلق حتى ذلك الزمن سوى قلة من المؤيدين خارج بريطانية العظمى، (2) لأن قوانين الترموديناميك، كما رأينا في الفصل السابق، عامة إلى أقصى حد ولا تحتاج في تطبيقها إلى فرضيات خاصة تتعلق بالبنية الذرية أو بخواص المادة الكهربائية التي لم يكن يُعرف عنها في ذلك الزمن سوى أشياء قليلة جداً. ومهما يكن من أمر فقد كان بلانك خبيراً في الترموديناميك وشعر أنه إذا أصاب في استنتاج قانون إشعاع الجسم الأسود الصحيح من مبادئ عامة كقانوني الترموديناميك الأول والثاني فإنه لن يلقى من يعارضه أبداً في استنتاجاته.

ولقد سار بلانك في عمله بكل عناية، فلم يلجأ إلا إلى أعم الفرضيات التي لا تذكر عن بنية المادة سوى أشياء قليلة، فافترض تمشياً مع الطرائق المسلّم بها في الترموديناميك أن الإشعاعَ في فرن مغلق عند درجة حرارة معينة T متوازنٌ مع جدرانه، وهذا يعني أن الإشعاع المؤلف من أطوال موجية (ألوان) متصلة ذات شدات مختلفة تظل درجة حرارته وشدته الكلية ثابتتين؛ وهذا التوازن ليس سكونياً بل هو ديناميكي بمعنى أن جدران الفرن تمتص طاقة (إشعاعاً) وتشع طاقة في وقت واحد، وأن معدل إصدار كل سنتيمتر مربع من جدران الفرن من طاقة لون ذي طول موجة معين يساوي بالتحديد معدل امتصاصه من هذه الطاقة. وليس في هذا ما يتنافى أبداً مع الترموديناميك، كما رأينا في الفصل السابق، إلا أن بلانك رأى عند تحليله للظاهرة أن عليه أن يضيف افتراضات عن الطريقة التي يتفاعل بها الإشعاع في الفرن مع الأشياء المادية الموجودة على جدرانه، وكان، ولا شك، يعرف أن الإشعاع في الفرن يتألف من أمواج مستقرة، أي أنها تشبه الأمواج المنتشرة على طول وَتَر كمانٍ بعد نقره، ولما كانت نهايتا هذا الوتر مثبتتين، لذلك تتألف الموجة المستقرة على طوله من صف من النقاط الساكنة (العقد) التي تفصل بينها مسافات متساوية، ومن اهتزازات عرضانية بين العقد ذات سعات عظمى متساوية (تسمى بطوناً). إن هذه الاهتزازات الدورية تماثل اهتزازات جسيم مربوط بطرف نابض مثالي يترك لكي يهتز حراً مع النابض، ويسمى هذا النوع من الحركة، الذي يمكن وصفه بالميكانيك النيوتني وصفاً كاملاً «حركة توافقية بسيطة»؛ لذلك أضاف بلانك افتراضاً مأمون العواقب تماماً، وهو أن جدران الفرن تتألف من نوابض صغيرة (هزازات توافقية) تقترن مع الإشعاع في الفرن. وهنا، عند هذه النقطة، رأى بلانك أن عليه أن يعتبر مفهوم الفعل، لأن طاقة الهزاز التوافقي (سعة اهتزازه) ترتبط بالفعل، بحسب وصف موبرتوي، برابطة بسيطة هي أن الفعل يساوي، في حالة هزة واحدة (أي ذهاب وعودة فقط)، طاقة الهزاز (أي مجموع طاقته

الكامنة وطاقته الحركية) مقسومة على تواتره (عدد الاهتزازات التي ينجزها في ثانية واحدة) . فالطاقة الصادرة إذاً عن هزاز توافقي واحد ذي تواتر معين (أي طول موجة معين) تساوي جداء فعله في تواتره . وكان بلانك يعرف من الترموديناميك أن مجموعة الأشياء (كالهزازات مثلاً) التي يمكنها ، في آن واحد ، أن تمتص طاقة من مختلف التواترات وتصدرها إذا جعلت في وسط إشعاع ذي تواترات مختلفة وفي درجة حرارة معينة (مثل مجموعة من قطع الفلين المختلفة الأحجام السابحة في ماءٍ مضطرب) ، فإن كل شيء (كل هزاز) يجب أن يكون له وسطياً الطاقة نفسها التي يمكن أن تتعين كلياً بدرجة حرارة الوسط الذي فيه الإشعاع . ولذلك لجأ بلانك إلى قلب الفكرة ، أو هذه الحجة الترموديناميكية ، وفكر بأنه إذا استطاع أن يستنتج وسطي طاقة هزاز واحد موجود في وسط إشعاعي ، فإنه سيكون قادراً على أن يستنتج نمط الإشعاع الصادر عن الهزازات (من جميع التواترات) المثارة عند درجة حرارة معينة .

وقد بدت هذه المسألة لبلانك سهلة جداً وواضحة المعالم ، إذ إنه إذا وُجد هزاز قادر على الاهتزاز بتواتر وحيد ، فإن الطاقة التي يصدرها عندما يكون في درجة حرارة معينة هي جداء فعله في تواتره ، ولا يمكن أن يصدر عنه سوى إشعاع واحد بهذا التواتر ؛ لذلك إذا ارتفعت درجة حرارته فإن الطريقة الوحيدة التي يمكن عندئذ أن يصدر بها مزيداً من الطاقة هي أن يزيد فعله الذي يقاس بسعة هزته ، وهذه السعة ينبغي ، كما كان يفترض في النظرية التقليدية أن تتغير تَغيراً مستمراً بتغير درجة الحرارة ما دام يمكن أن يكون لهزاز أي قيمة للفعل . وهكذا حاول بلانك أن يتوصل إلى صيغة الإشعاع الصحيحة باستخدام هذه الفكرة ، مع ملاحظة أن لكل الهزازات وسطياً الكمية نفسها من الطاقة بغض النظر عن تواتراتها ، إلا أنه أخفق في محاولته ، ولاحظ أنه مهما كانت الحيل الرياضية التي يستخدمها أو المبادئ التقليدية التي يطبقها ، فإنه سيخفق لا محالة . وبعد عمل كثير وكرب وشكوك ، وجد بلانك أن عليه أن ينبذ هذا المفهوم التقليدي القائل بأن فعل الهزاز (أو سعته أساساً) يمكن أن يتخذ أي قيمة وأن يستبدل به مفهوم الفعل الكمومي ، الذي سنرى في الفصل القادم كيف أرشد بلانك إلى صيغة الإشعاع الصحيحة وأرشد أينشتاين إلى مفهوم الفوتون ، المفيد إلى حد بعيد .

صيغة بلانك في إشعاع الجسم الأسود وفوتون أينشتاين

«لطالما قلت لك حين استبعدت المستحيل بأن ما يبقى، أياً كان ومهما كان بعيد الاحتمال، يجب أن يكون الحقيقة».

ـ السير أرثر كونان دويل*

رأينا في الفصل السابق أن السبب في ظهور نظرية الكم في الإشعاع يرجع إلى أن الفيزياء التقليدية، بوصفها تتضمن قوانين نيوتن في الحركة والترموديناميك ونظرية مكسويل الكهرطيسية في الإشعاع، عاجزة عن أن تصف وصفاً صحيحاً إشعاع الجسم الأسود، أي طيف الطاقة المتصل الصادر عن ثقب مساحته 1سم^2 في جدار فرن له درجة حرارة مطلقة معينة؛ ولكن دراسة هذا الطيف تجريبياً كانت قد تمت قبل اكتشاف بلانك الصيغة الجبرية الصحيحة بعدة سنوات، لذلك كان الفيزيائيون النظريون، مثل بلانك، يعرفون هدفهم حين كانوا يسعون إلى استنتاج الصيغة من مبادئ أولية، وهو أن عليهم إيجاد صيغة يمكن أن تحسب منها الشدة الصحيحة للإشعاع الذي له تواتر معين والمنبعث من فرن له درجة حرارة معينة، أي يجب أن تعطي هذه الصيغة جبرياً شدة الإشعاع بدلالة تواتره ودرجة الحرارة المطلقة فحسب فلا تتضمن غيرهما، وتكون قيمة الشدة التي تحسب منها في حال تواتر معين متفقة مع الشدة الملحوظة عند هذا التواتر.

ولفهم مشكلة الجسم الأسود، دعونا ندرس باختصار كيف كانت حالة البحث فيها نظرياً وتجريبياً عندما بدأ بلانك تحرياته النظرية التي قادته إلى اكتشافه الثوري «كم الفعل»، فقد كان العمل التجريبي واضح الخطوات لأن كل ما كان يجب عمله هو أن يُرسل عبْر موشور إشعاع

* Sir Arthur Conan Doyle (1859-1930) طبيب إنكليزي اشتهر بقصصه البوليسية التي ابتكر لها شخصيتين تعدّت شهرتهما شهرة المؤلف نفسه وهما شرلوك هولمز ووطسون.

الجسم الأسود لكي تتفرق ألوانه إلى مختلف أطوال موجاتها متدرجةً من تحت الأحمر (الأمواج الطويلة) حتى فوق البنفسجي (الأمواج القصيرة جداً) ثم يُستخدم مقياس ضوئي (فوتومتر) حساس ليقيس الشدة أو كمية الطاقة في كل موجة (أو فعلياً في كل شريط طيفي ذي طول موجة معين)، فتتجمع بهذه الطريقة بيانات يمكن تمثيلها على أحسن وجه بتحديد الشدات على طول محور شاقولي يقابلها على المحور الأفقي مختلف أطوال الموجات فنحصل على مجموعة من النقط البيانية التي إذا وصلنا ما بينها بخط متصل،تكوَّن منحنٍ، هو منحني بلانك الشهير في الإشعاع، الذي يرينا بلمحة سريعة السمات الأساسية لإشعاع الجسم الأسود الذي يتلاءم مع معرفتنا السطحية عن نوع الإشعاع الذي يتوقع المرء أن الفرن يصدره عند درجة حرارة معينة. فعند الموجات الطويلة جداً (ما تحت الحمراء أو الألوان الحمراء) ينبسط المنحني متقارباً من محور أطوال الموجات (أي تكون الشدة منخفضة) ثم يرتفع ببطء إلى أن يصل إلى نهاية عظمى (ذروة) عند لون معين وينقلب بعدها هابطاً بحدة إلى الصفر في منطقة ما فوق البنفسجي.

ونلاحظ في هذا الخط البياني ثلاث سمات مهمة لأنها تجعلنا نكوّن فكرة عن خواص الإشعاع التي يجب أن تُستنتج من نظرية أساسية: الأولى هي أن الطاقة الكلية الصادرة في الثانية في جميع الألوان تُعطى بالمساحة الواقعة تحت الخط البياني؛ وحين ترتفع درجة حرارة الفرن ينزاح المنحني البياني نحو الأعلى فتزداد بذلك المساحة الواقعة تحته مشيرة إلى أن معدل إشعاع الفرن يزداد مع تزايد درجة حرارة الفرن المطلقة. فإذا قارنا بين المساحات الواقعة تحت المنحنيات التي رسمت لمختلف درجات الحرارة، وجدنا أن معدل إشعاع الفرن للطاقة يتزايد متناسباً مع القوة الرابعة لدرجة حرارته المطلقة. وكان أول من اكتشف هذه الخاصة تجريبياً في إشعاع الجسم الأسود من قياس المساحات هو الفيزيائي التجريبي الألماني ستيفان Stefan، ثم استنتجها الفيزيائي النظري النمساوي العظيم لدفيغ بولتزمان من الترموديناميك التقليدي، لذلك تعرف اليوم هذه الخاصة باسم قانون ستيفان ـــ بولتزمان.

والسمة الثانية هي أن الذروة على المنحني، أعني طول الموجة (أو شريط اللون من الطيف) الذي تبلغ عنده شدة إشعاع الجسم الأسود نهايتها العظمى تنزاح نحو اليسار (إلى جهة الموجات الأقصر) كلما ازدادت درجة الحرارة، فيستطيع المرء أن يستقرئ من المنحنيات التي رسمت للإشعاع في درجات حرارة مختلفة، أنه في كل منحنٍ، يكون جداء طول موجة الشدة الأعظمية في درجة الحرارة الخاصة بالمنحني هو دائماً العدد نفسه؛ وهذه العلاقة (التي تُعرف اليوم باسم قانون فين Wien للإزاحة)، كان قد استنتجها الفيزيائي الألماني ولْهلم فين من قوانين مكسويل في الإشعاع. ولكن هذين القانونين هما أقصى ما أمكن للفيزيائيين النظريين أن يحصلوا عليه من النظريات التقليدية في محاولتهم للحصول على صيغة جبرية تتفق مع كامل منحني إشعاع الجسم الأسود، الأمر الذي

يجرنا إلى السمة الثالثة لهذا الخط البياني وهي شكله الصحيح.

إذ يتبين من السِمتَين الأولى والثانية في إشعاع الجسم الأسود أنهما تتفقان مع ملاحظاتنا السطحية عن الإشعاع، فهذه الملاحظات تُظهر أنه كلما سُخن الفرن ازدادت سرعة إشعاعه في كافة الألوان، وأنه كلما تغير الإشعاع من تحت الأحمر (الذي نستطيع أن نشعر به ولكننا لا نراه) إلى الأحمر الفاتح، وأخيراً إلى الأزرق الضارب إلى البياض، ترتفع درجة الحرارة من بضع مئات الدرجات المطلقة إلى آلاف الدرجات، فالسؤال الذي تثيره هذه الملاحظات بصورة طبيعية هو: لماذا تتحكم درجة حرارة الفرن بلون (أو تواتر) الإشعاع الصادر؟ ثم بوجه خاص، لماذا تتطلب الألوان الزرقاء درجة حرارة عالية؟ وقد جرت محاولتان للإجابة عن هذين السؤالين بالاعتماد على هيكل الفيزياء التقليدية، قام بالأولى فيزيائي في نهاية القرن التاسع عشر هو اللورد رايْلي، وقام بالثانية الفيزيائي الألماني فين، غير أن المحاولتين لم تنجحا إلا نجاحاً جزئياً.

كان اللـــورد رايلي Lord Rayleigh (1842-1919)، واسمه الأصلي ج. و. ستـــروت J.W.Strutt ـــآخر الفيزيائيين البريطانيين الكلاسيكيين الكبار. وقد ولد في ويتام Withamمن مقاطعة إسِّكْس في إنكلترا، وكان والده الذي يحمل الاسم نفسه عضواً في المجتمع الأرستقراطي (النبلاء)، وأمه هي ابنة جندي زينته الأوسمة. وقد أظهر ستروت مؤهلاته الفكرية في سن مبكرة، إلا أنه كان ولداً نحيلاً غالباً ما يقطع المرض تعليمه، فكان حضوره نادراً في كلية إيتون، لأنه كان يقضي معظم أيامه في المشافي[1]، فوجد ستروت سبيـلاً إلى إتمام دراسة ثلاث سنـوات في مدرسة خاصة في وِمْبلْدون قبل أن ينتسب إلى هارو، إلا أنه اضطر مرة أخرى إلى الانسحاب بسبب ضعف صحته، فأكمل تعليمه التحضيري في أربع سنوات بمساعدة معلم خاص. وفي عام 1861 انتسب إلى كلية ترينيتي في كمبردج. وعلى الرغم من أنه لم يكن موهوباً في الرياضيات مثل بعض زملائه الطلاب، فقد كان مجداً في دراساته إلى أن أصبح بارعاً في موضوعات دراسته ونال درجة الشرف الأولى بلقب (شديد المراس) Wrangler في فحص التريبوس في الرياضيات، وفي إثْر ذلك منح ستروت منحة جامعية لمتابعة دراساته في كمبردج التي أكملها في عام 1871، وكان في أثناء ذلك قد تابع دراساته في الرياضيات والفيزياء وأجرى عدداً من التجارب في الكهرباء والمغنطيسية.

وفي عام 1871 انقطع ستروت عن عمله العلمي بسبب حمى راشحة أصابته بعد مدة وجيزة من زواجه، حتى لقد ظُن لفترة من الزمن أنه لن يعيش حتى نهاية العام، إلا أنه استعاد صحته تدريجياً في أثناء إجازة طويلة قضاها في اليونان ومصر، تضمنت رحلة في النيل على ظهر عوامة (منزل عائم)[2]، فكان من الطبيعي أن يشجعه تغيير الأجواء على العمل، فبدأ بأهم كتبه «نظرية الصوت» الذي ظهر في جزأين في عامـي 1877 و1878[2] وهـو يتضمـن دراسة ظواهـر الاهتـزاز والتجاوب (الطنين) والصوتيات، وقد «ظل المعْلَم الرئيسي في علم الصوت»[2].



جون وليم ستروت اللورد رايلي (1842-1919)

وما أن عاد ستروت إلى إنكلترا حتى توفي والده فأصبح هو البارون رايلي الجديد ونجم عن هذا اللقب مسؤوليته عن إدارة (7000) أكر (الأكر يساوي نحو أربعة آلاف متر مربع) هي ملكية الأسرة التي اتخذها موطناً لإقامته وبنى فيها مختبراً بالقرب من المنزل لكي يستطيع متابعة بحثه العلمي في الكهرطيسية والصوت «وربما كان أهم أعماله المبكرة هو نظريته التي تفسر لون السماء الأزرق بأنه نتيجة لانتشار أشعة الشمس بجسيمات صغيرة موجودة في الجو»[2]. وأضاف رايلي أيضاً إلى معارفه العلمية تطبيقه لأشهر التقنيات الزراعية المتقدمة في زمانه لكي يزيد من مردود ملكيته. وعلى الرغم من أنه كان ملّاكاً مزارعاً ناجحاً كل النجاح، فقد نقل إدارة الملكية في عام 1876 إلى أخيه الأصغر لكي يتفرغ كلياً للعلم[3].

وفي عام 1879 خلف رايلي مكسويل في كمبردج وتسلم إدارة مختبر كافندش. وفي أثناء ذلك نشر عدداً من البحوث الهامة وأشرف على برنامج بحث متطور غرضه معايرة القياسات الكهربائية، كما تقدم أيضاً ببرامج لتحسين نوعية المعلومات التي تعطى لطلاب كمبردج. ومع ذلك فقد وجد أن أعباءه الإدارية في مكتبه مرهقة أكثر منها مجزية، فتخلى في عام 1884 عن مركزه وعاد إلى ملكيته. وما أن انفك عن عمله حتى عُيّن أميناً للجمعية الملكية، فخلف في عام 1887 أ. تندال ليصبح أستاذاً للفلسفة الطبيعية في معهد بريطانيا الملكي واستقر في هذا المنصب حتى عام 1905[3].

كان رايلي مختلفاً عن معاصريه في أنه كان حراً في بحث الموضوع الذي يروق له أكثر من غيره ، لا سيما أنه أمضى معظم عمله العلمي خارج المحيط الجامعي ، لذلك كانت اهتماماته متنوعة « فكانت أعماله الأخيرة تتطرق إلى كل حقول الفيزياء تقريباً فشملت الصوت ونظرية الأمواج ورؤية الألوان والإلكترودبناميك والكهرطيسية وانتشار الضوء وجريان السوائل وديناميك السوائل (الهدروديناميك) وكثافة الغازات واللزوجة والظاهرة الشعرية والمرونة والتصوير الضوئي »[4] . وكان يفضل أن يعمل في مجالات متعددة من الفيزياء في الوقت نفسه ، لأنه يجد في الانتقال من موضوع إلى آخر وفق رغبته باعثاً على تقوية نشاطه . ولحسن الحظ أن ولعه بالكهرباء لم يخفّف من جودة بحوثه أو يفسد وضوح نشراته الباهر .

ولقد اشتهر رايلي على الأرجح أكثر ما اشتهر باكتشافه غاز الأرغون الذي نجح أخيراً بعزله عام 1895 بعد تجارب مجهدة ، ولكنه لم يكن صاحب الفضل الوحيد بهذا الاكتشاف فقد شاركه فيه و . رامزي W.Ramsay الذي توصل إليه بمعزل عن رايلي مع أنه لم يبدأ العمل به إلا بعد أن نشر رايلي نتائجُ تجاربه الأولى . ومهما يكن من أمر ، فقد أفضى اكتشاف رايلي إلى منحه جائزة نوبل للفيزياء عام 1904 ، أما صنوه رامزي فقد مُنح الجائزة نفسها في الكيمياء لدوره في هذا الاكتشاف .

ولقد عمل رايلي مستشاراً للحكومة البريطانية في عددٍ من الفعاليات ، كما كان له مكانه في مجلس اللوردات ، ولكنه لم يتحدث فيه إلا في مناسبات نادرة ، وعمل أيضاً رئيساً لجامعة كمبردج ومُنح العديد من درجات الشرف ونال وسام الاستحقاق وكل درجات الشرف الهامة التي يمكن أن تمنحها الجمعية الملكية . ونشر نحو 500 نشرة علمية في أثناء عمله واحتفظ بطاقاته العقلية حتى آخر يوم من حياته .

وقد استخدم رايلي الذي هيْمن مع اللورد كلفن على الفيزياء البريطانية في الربع الأخير من القرن التاسع عشر طريقة ذكية جداً في استنتاج صيغة إشعاع الجسم الأسود ، فقد شبه اهتزازات أمواج الإشعاع في جوف (الجسم الأسود) عند درجة حرارة معينة باهتزاز الهزازات التي تتحرك حركة توافقية بسيطة ، فعزا بذلك لكل اهتزاز طاقة الهزاز المناسب من الهزازات المذكورة . ويحسن بنا لكي نتابع رايلي في تفكيره أن نتأمل في إشعاع الجسم الأسود عندما يكون في حالة توازن حراري مع جدران الفرن عند درجة حرارة ثابتة ، أي أن كمية (أو شدة) الإشعاع الذي له تواتر معين (أو طول موجة معين) في كل واحدة حجوم من الفرن تبقى ثابتة على الرغم من استمرار الجدران في امتصاص الإشعاعات من جميع التواترات وإصدارها ؛ فهذا الإشعاع موجود داخل الجوف على صورة أمواج عرضانية ولكنها ليست أمواجاً متقدمة تواصل سيرها من دون حواجز من أي نوعٍ كان ، بل هي أمواج مستقرة بسبب جدران الجوف التي تحتجزها . وتحدث الأمواج المستقرة بين حاجزين مستويين إذا انعكست الموجة المتقدمة عن أحدهما ثم عن الآخر جيئة وذهاباً بين الحاجزين بحيث يتم التداخل

بين الموجة المتقدمة والموجة المنعكسة. ويمكن إحداث موجة من هذا القبيل بتثبيت وتر مشدود شداً محكماً عند طرفيه، فتظهر فيه الموجة المستقرة على صورة سلسلة من الاهتزازات العرضانية (المتفقة كلها بالطور) والتي يفصل بينها، وعلى مسافات متساوية، نقاط ساكنة، وتدعى الأقسام المهتزة بطوناً والنقاط الساكنة عقداً. ولما كان طرفا الوتر مثبتين ويفصل بين العقد مسافات متساوية من أجل أي تواتر معيّن، فإن عدد البطون يساوي حاصل قسمة طول الوتر على نصف طول الموجة.

ولقد طبق رايلي هذه الطريقة في تكوين الموجة المستقرة على الإشعاع الموجود في جوف الجسم الأسود بأن تصور أن الإشعاع الذي له تواتر معين يتألف من أمواج مستقرة على طول خط يعمل بين نقطتين لا على التعيين من أي جدارين متقابلين في الجوف؛ هذا إذا كان الجوف مكعب الشكل، فيكون عدد الاهتزازات المقترنة بأي موجة مستقرة من الإشعاع يساوي حاصل قسمة ضلع المكعب على نصف طول الموجة؛ وبهذه الطريقة حَسَبَ رايلي عدد اهتزازات الإشعاع المختلفة التي يحويها مكعب ذو حجم معين: وهذا الحساب يناسب الاهتزازات العالية التواتر (أي القصيرة الأمواج) أكثر مما يناسب الاهتزازات المنخفضة التواتر، لأن ما يمكن رصفه من أنصاف الموجات القصيرة على أي قطعة مستقيمة ذات طول معين هو أكثر مما يمكن رصفه من أنصاف الموجات الطويلة. ثم بعد أن افترض أن كل اهتزازة مستقرة كهذه هي هزازة بتوافقية بسيطة، عزا لكل من هذه الهزازات كمية من الطاقة أملتها عليه نظرية تساوي تحاص الطاقة التي تقول إن مقدار الطاقة يساوي جداء ثابت بولتزمان في درجة حرارة الجوف المطلقة، وتسمى الصيغة التقليدية التي وجدها رايلي لإشعاع الجسم الأسود «صيغة رايلي ـــ جينز» مع أن جينز الذي اقترح تصحيحاً بسيطاً على صيغة رايلي لم يحتج إلى أكثر من بعض التعديل في المفهوم الأصلي. وتبعاً لتفكير رايلي واستنتاجه الذكي لهذه الصيغة في إشعاع الجسم الأسود، نرى أن شدة إشعاع الجسم الأسود الصادر عن فرن عند أي درجة حرارة كانت يجب أن تزيد تبعاً لهذه الصيغة كلما زاد تواتر الإشعاع الصادر، لأن شدة الإشعاع بحسب الصيغة المذكورة تتناسب مع مربع التواتر. وهذا غير معقول وضوحاً، لأنه يعني أن جميع الأفران يجب أن تقذف دفعات هائلة من الإشعاع فوق البنفسجي.

على أن صيغة رايلي ـــ جينز، مع أنها لا تعطي نتائج معقولة في حالة التواترات العالية في طيف إشعاعات الجسم الأسود، تلائم جداً حالة التواترات المنخفضة، وهذا يعني أنه يمكن استخدام فيزياء نيوتن ومكسويل التقليدية في وصف الإشعاعات الطويلة الموجة وصفاً دقيقاً مناسباً. أما في حالة الإشعاعات القصيرة الموجة أو العالية التواتر فلا فائدة ترجى من استخدامها. والسؤال الذي يتبادر فوراً إلى الذهن فيما يتعلق بهذا الخذلان الذي واجهته الفيزياء التقليدية هو: أين الخلل وكيف يمكن إصلاحه؟ وقد رأينا عند دراستنا لقوانين الغازات أن قوانين نيوتن تخيب أيضاً عند حساب حرارة الغازات النوعية لأنها تؤدي إلى بعض الفروق بين الحسابات النظرية والقياس.

ويستطيع المرء أن يخمّن منذ الآن أن الخلل في الفيزياء التقليدية هو واحد في الحالين، وهذا بالفعل هو ما سنراه. فالسؤال انحصر إذاً في: أين الخلل وكيف يمكن إصلاحه؟ ولكننا نرى منذ الآن أن هذا الخلل ليس في الطريقة التي حسب بها رايلي درجات حرية الاهتزاز المتعلقة بالأمواج المستقرة التي عزاها لإشعاع الجسم الأسود، لذلك لم يبق إذاً سوى استنتاج واحد هو أن الخلل ينبع من نظرية تساوي التحاص التقليدية التي تنص على أنه حين تكون مجموعة جمل ديناميكية (مثل جسيمات غاز أو أمواج مستقرة في إشعاع جسم أسود) في درجة حرارة ثابتة، فإن كل درجة من درجات الحرية فيها يجب أن يكون لها وسطياً كمية الطاقة نفسها التي تساوي جداء ثابت بولتزمان العام في درجة الحرارة المطلقة للمجموعة. وكان فين الذي تقدم أيضاً بصيغته الخاصة المتعلقة بشدة إشعاع الجسم الأسود، قد أدرك أن هناك خطأ في نظرية تساوي التحاص التقليدية، إلا أنه لم يتوصل إلى صيغته انطلاقاً من هذه النقطة، لأنه لم يعرف كيف يجب أن يقوم بذلك، ولكنه استخدم فيزياء بولتزمان الإحصائية دليلاً يهديه إلى صيغته لأنه كان يعرف أن الصيغة الصحيحة يجب أن تنطبق على الإشعاعات العالية التواتر في طيف إشعاع الجسم الأسود. وكان مكسويل وبولتزمان، مستقلّين، أول من طبق الفيزياء الإحصائية (أو الميكانيك الإحصائي) بنجاح لتعيين متوسط سرعة الجزيئات في غاز عند درجة حرارة معينة، وكذلك لمعرفة عدد جزيئات الغاز التي لها طاقة معينة، ويُظهر التحليل أن عدد الجزيئات يتضاءل تضاؤلاً أسياً كلما ازدادت طاقتها، ولكن سرعة هذا التضاؤل تتناقص مع تزايد درجة الحرارة؛ وهذا أمر معقول، إذ يعني أنه كلما ازدادت درجة حرارة المجموعة ازداد فيها عدد الجسيمات التي طاقتها مرتفعة. ومع ذلك لا يمكن، بحسب قانون الترموديناميك الأول، أن يكون مجموع طاقات الجسيمات كلها أكبر من الطاقة الكلية للمجموعة.

وقد التقط فين هذه الفكرة وطبقها على التواترات المختلفة في إشعاع الجسم الأسود بدلاً من الطاقات، وذلك بأن طبق على عدد العقد الاهتزازية، في حال تواترات عالية، حاجزَ تواترٍ يتغير أسياً مع درجة الحرارة، فشمل بذلك التواترات العالية، وحصل على صيغة تمثل إشعاع الجسم الأسود تمثيلاً صحيحاً في حالة التواترات العالية من الطيف، ولكنه يعطي نتائج خاطئة في حالة التواترات المنخفضة. وقد احتار الفيزيائيون في أمر هذه الصيغة لأنهم لم يستطيعوا أن يفهموا لماذا يجب أن يتصرف التواتر والطاقة في الطبيعة بطريقة واحدة. ثم لماذا يصح تطبيق صيغة إحصائية على الأمواج مع أن هذه الصيغة وجدت أصلاً لتطبق على الجسيمات المادية.

كانت تلك هي حال نظرية إشعاع الجسم الأسود عندما بدأ بلانك بحوثه التاريخية في هذا الموضوع ساعياً إلى إيجاد الصيغة الجبرية الصحيحة التي تصح في كامل مجال الطيف بالاعتماد على الترموديناميك التقليدي؛ وقد ركز، لإيجاد هذه المهمة، على العلاقة بين أنتروبية الإشعاع وطاقته بدلاً من درجة حرارة الإشعاع، لأنه تخيل أن الإشعاع في حالة توازن مع هزازات توافقية حقيقية ذات

تواترات متغيرة موجودة في جدران الفرن. وكانت فكرته هي أن هذه الهزازات تمتص الإشعاع مهما كان تواتره ثم تعيد إصداره على صورة نطاق كامل من التواترات، وبذلك يحافظ الجسم الأسود على طبيعته في الإشعاع. وكان لا بد لتنفيذ ذلك من أن يكون لديه فكرة عن وسطي طاقة الهزاز، وهكذا قدّر أنه كان باستطاعته حساب هذا الوسطي بالطريقة المألوفة التي تُحسب بها القيم الوسطى، وهي طريقة تقوم على جمع طاقات الهزازات كلها مع إعطاء كل طاقة المقدار المناسب (أي احتمال أن يكون للهزاز هذه الطاقة)، ثم يقسم هذا المجموع على عدد الهزازات كلها. وهنا تتداخل الأنتروبية في هذه الطريقة لأن احتمال أن يكون للهزاز طاقة معينة يرتبط، حسبما أثبت بولتزمان، بالأنتروبية بطريقة أسية، فكان بلانك مقتنعاً بأنه يستطيع أن يحصل من الترموديناميك على صيغة الإشعاع الصحيح، لأن الطاقة والأنتروبية مرتبطتان بدرجة الحرارة؛ ولكنه كان بحاجة، للقيام بذلك، إلى صيغة تعطي طاقة الهزاز التوافقي عند معرفة تواتره، وهذا ما كان استنتاجه يتم بطريقة مباشرة من ديناميك نيوتن، إذ تساوي طاقة الهزاز جداء تواتره في الفعل المبذول في هزة واحدة. وكان بلانك قد أشار للفعل بالحرف h وعبّر عن الطاقة E بالمعادلة $E = h\nu$، حيث ν تواتر الهزاز، ثم حسب طاقة الهزازات مستعيناً بهذه المعادلة وبصيغة الاحتمال لبولتزمان فتوصل إلى صيغة تختلف عن الصيغة التقليدية التي سبق الحصول عليها من نظرية تساوي التحاص.

وتنص نظرية تساوي التحاص على أن طاقة الهزاز الوسطية في منظومة درجة حرارتها T لا تتعلق بتواتر الهزاز بل تتغير مباشرة بتغير درجة الحرارة فقط، وهذه الفكرة تؤدي إلى قانون رايلي ـــ جينز الخاطىء. أما قيمة الطاقة الوسطى للهزاز التوافقي التي وجدها بلانك فتتعلق بطريقة معقدة بالتواتر وبدرجة الحرارة، ويظل تعقيدها قائماً ما دام h (كم الفعل) قيمة منتهية مختلفة عن الصفر. ولم يكن بلانك سعيداً إزاء هذا الشرط لأنه شعر بأنه يمثل شرخاً في مفاهيمه الأساسية على الرغم من أن صيغة الجسم الأسود التي حصل عليها بدلالة عبارته لطاقة الهزاز الوسْطى كانت صحيحة. وحين جعل h تتناهى إلى الصفر وصل إلى قانون رايلي ـــ جينز. وهكذا ترك h كمية منتهية، الأمر الذي يعني أن طيف إشعاع الجسم الأسود لا يمكن تفسيره إلا إذا فرضنا أنه لا يمكن أن يوجد فعل في الطبيعة أدنى من h، وهذا يعني أن الفعل كمومي وأن h التي قيمتها بالوحدات الأساسية $6{,}625 \times 10^{-27}$ إرغة ثانية هي وحدة كم الفعل.

وكان السبب في عدم رضا بلانك عن هذه النتيجة هو إدراكه بأن كمومية الفعل لا تتفق مع نظرية مكسويل الكهرطيسية في الإشعاع لأن هذه النتيجة تعني أن الإشعاع جسيمي وليس له مظهر موجي؛ ولكنه لم يتخل، مع ذلك، عن صيغته في إشعاع الجسم الأسود بل اقترح، لكي يتغلب على هذه الفكرة الناشزة، أن إشعاع الجسم الأسود ينبعث على هيئة قطع (أو كموم) تتحول مباشرة (بعد صدورها) إلى أمواج، فقد كان واثقاً كل الثقة من صحة صيغته لأنه كان قد حصل،

قبل أشهر من هذه النتيجة، على الصيغة نفسها تماماً من صيغة رايلي ــ جينز وصيغة فين في عبارة جبرية واحدة كان بلانك يرى أنها مجرد حيلة رياضية ليس لها أساس فيزيائي، ولذلك كان مقتنعاً، عندما حصل على الصيغة نفسها باستخدام الترموديناميك وشرط استكمام الفعل، بأن صيغته صحيحة على الرغم من أنه لم يلمّ بكل معاني اكتشافه.

مساهمة أينشتاين في نظرية الكم

نشر ألبرت أينشتاين سلسلة من البحوث عن الإشعاع، كان الأول منها واحداً من ثلاث مقالات ثورية ظهرت في عام 1905 في عدد واحد من مجلة **Annalen der Physik** (حوليات الفيزياء)، وهو ذاك الذي يحمل العنوان المتواضع «أمور تتعلق بوجهة نظر موجية عن توليد الضوء وتحويله»، فلم يكن في هذا العنوان ما يعطي دلالة على الصدى العميق الذي خلّفه في الفيزياء، ولا سيما في فهمنا لنظرية الكم وطبيعة الإشعاع؛ فقد بدأ أينشتاين بحثه بالإشارة إلى الفروق العميقة بين القوانين التي تحكم الأجسام المادية (قوانين نيوتن في الحركة)، والقوانين التي تحكم الإشعاع (نظرية مكسويل الكهرطيسية الموجية)، فقد لاحظ أن ما يجعل هذه الفروق واضحة المعالم هو إمكان تحديد وضع الجسيمات (الوضع والاندفاع) واستحالة تحديد وضع الأمواج (الإشعاع)؛ وقد أشار عندئذ إلى أن هذه الفروق لا يمكن أن تكون نهائية وحاسمة كما تبدو، وأن هناك ظواهر إشعاعية لا يمكن تفسيرها إلا إذا كانت نظرية الأمواج تبدي جانباً من طبيعة الإشعاع هو ما يجب أن يرى فيه المرء إمكانية أن «يوزع الإشعاع توزيعاً متقطعاً في المكان» بدلاً من أن يُنظر إليه على أنه موجة متصلة لا يمكن تقطيعها.

ثم اعتبر أينشتاين انطلاقاً من هذه الفكرة الأساسية إشعاعاً محصوراً في وعاء حاوٍ جدرانه تعكس الإشعاع عكساً كلياً، وأثبت أنه إذا كانت صيغة بلانك تستجيب إلى التوزع الطيفي لهذا الإشعاع (أي إذا كانت شدة الإشعاع تابعة للتواتر وفقاً لصيغة بلانك)، فإن الإشعاع يبدي عندئذ كل سمات الغاز (كالضغط مثلاً والأنتروبية)، ويتصرف مثله وكأنه يتألف من حبيبات (كموم) طاقية، كلّ منها $h\nu$ (جداء ثابت بلانك في التواتر)، وهذا، وضوحاً، هو ما أثبت وجود كموم الضوء التي دُعيتْ بعد ذلك «فوتونات»، وهو مفهوم لم يقبل به بلانك، أما أينشتاين فقد ذهب في تحليله للإشعاع إلى أبعد من ذلك، إذ أثبت أن تفاوت طاقة الإشعاع في حيز صغير من الحاوي (إن الطاقة في حيز صغير تتغير من لحظة إلى أخرى تغيراً عشوائياً) هو مجموع حدّين يمكن استنتاج أحدهما من نظرية مكسويل الموجية في الضوء (وهو الاستنتاج التقليدي القياسي)، أما الثاني فهو ذو طبيعة كمومية بحتة (ليس تقليدياً) وينشأ عن وجود كموم في الإشعاع، وهذا ما يثبت أنه لا يمكن إهمال المظهر الموجي في الإشعاع، لا ولا المظهر الجسيمي فيه (الفوتونات)، وإلا لوقع

خطأً في التحليل. وهذا أول مثال عن المثنوية Duality (موجة ــ جسيم التي تكتسح الآن كل مجالات الفيزياء، والتي سنورد المزيد عنها في دراستنا لميكانيك الكم والنظرية الموجية للإلكترون).

وقد أكمل أينشتاين بحثه هذا بأن بيّن بطريقة سهلة جداً أن نظرية الكم في الضوء تفسر الأثر الكهرضوئي الشهير الذي سبق لنا ذكره عند دراستنا لتجارب هرتز التي أثبتت صحة نظرية مكسويل الكهرطيسية في الضوء، فقد اكتشف هرتز أنه عندما يثير بإشعاع فوق بنفسجي كرة معدنية مشحونة، فإنها سرعان ما تفقد شحنتها، في حين أنه لا يحدث ذلك عندما يسلط على الكرة أشعة حمراء؛ وكان ج. ج. تومسون قد اكتشف الإلكترون، فأصبح واضحاً أن الإشعاع فوق البنفسجي ينتزع الإلكترونات من سطح الكرة فيفرغ شحنتها، ولكن الشيء الذي لم يكن واضحاً هو لماذا لا تستطيع الأشعة الحمراء أن تقوم بالعمل نفسه وفقاً لما تتطلبه نظرية الأمواج الكهرطيسية التقليدية؛ فالإلكترونات التي تُنتزع من سطح الكرة المعدنية، لأنها تمتص من الإشعاع ما يكفي لتحطيم الروابط التي تثبتها على الكرة، لا بد أن تُنتزع وفقاً لنظرية الأمواج التقليدية بالضوء الأحمر مثلما انتُزعت بالإشعاع فوق البنفسجي، إذ تنص النظرية التقليدية على أن الطاقة التي يحملها الإشعاع إلى الكرة في ثانية واحدة تتوقف على شدة الموجة (أي على سعتها) فقط وليس على طول موجتها (أو تواترها)؛ ولكن التجارب كذبت هذه النظرية، فقد بينت أنه مهما كانت شدة الضوء الأحمر فإنها لا تستطيع انتزاع الإلكترونات، في حين تستطيع ذلك حزمة ضعيفة جداً من الإشعاع فوق البنفسجي.

وقد فسر أينشتاين هذه النتيجة باستخدام مفهوم كم الضوء (الفوتون)، إذ يُنتزع كل إلكترون بامتصاصه فوتوناً واحداً، ولذلك يجب أن تكون طاقة الفوتون كافية للقيام بالعمل المطلوب لانتزاع الإلكترون وإعطائه طاقته الحركية المرصودة ولكن تواتر الفوتون الأحمر أضعف، بحسب صيغة بلانك، من أن تكون طاقته كافية للقيام بالعمل المطلوب (وهو انتزاع الإلكترون)؛ لذلك مهما كان عدد الفوتونات الحمراء التي تصيب الكرة المعدنية فإنها لا تنتزع الإلكترونات. هذا من جهة، ومن جهة أخرى فإن تواتر الإشعاع فوق البنفسجي كبير بما يكفي لأن ينتزع فوتونُه إلكتروناً من قاعدته المعدنية. ولم يكتف أينشتاين بذلك، بل كشف أيضاً خاصة أخرى في السيرورة الكهرضوئية وهي أن الإلكترونات تُنتزع من نقاط منفصلة في سطح المعدن، مما يدل على أن كل نقطة من هذه النقاط تلقت حُبيْبة (أو كم) طاقة. ويمكن للموجة أن تنتشر على الكرة بأكملها فتستطيع كل نقطة من الكرة أن تصدر إلكتروناً. وقد وضع أينشتاين معادلة بسيطة تعطي تواتر الفوتون اللازم لانتزاع إلكترونٍ من سطح المعدن واكتساب طاقته الحركية المرصودة، وقد نال جائزة نوبل في الفيزياء للعام 1921 على معادلته تلك التي شرحها في نحو صفحة واحدة، والتي تم التحقق من صحتها بتجارب روبرت ميلّيكان.

ولكن معظم فيزيائيي ذلك العصر كانوا ينظرون إلى نظرية الكم على أنها مجرد تقنية رياضية مصطنعة غايتها تفسير طيف إشعاع الجسم الأسود المتصل ، وأنه ليس لها أي مضمون فيزيائي ، فكان مفهوم الفوتون بالتحديد مفهوماً نابياً إذا قورن بالنجاح العظيم الذي حققته نظرية مكسويل في الأمواج الكهرطيسية . ومع ذلك ، فقد قبل أينشتاين بنظرية الكم بصفتها حقيقة علمية راسخة يمكن تطبيقها في كل مجالات الفيزياء ، وقد بحث ، تمشياً مع هذا الاعتقاد ، مسألة الحرارة النوعية في الأجسام الصلبة وطبق عليها نظرية الكم ، فتبين له السبب في أن القيم المقيسة للحرارة النوعية لا تتفق إطلاقاً عند درجات الحرارة المنخفضة مع القيم التي حُسبت بالاعتماد على النظرية التقليدية ، إذ إن الجسم الصلب يُعالج وفقاً لهذه النظرية بوصفه مجموعة من الهزازات التوافقية (فيُنظر إلى الجزيئات على أنها تهتز اهتزازاً مرناً بفضل قوى التجاذب بينها والتي تحافظ عليها مشدودة بعضها إلى بعض) ، ثم يُعزى إلى كل طريقة في الاهتزاز طاقة « التحاص بالتساوي » الوسطية التقليدية (التي تساوي جداء ثابت بولتزمان في درجة الحرارة المطلقة) . وهكذا تؤدي هذه الطريقة إلى قيمة غير صحيحة للحرارة النوعية عند درجات الحرارة المنخفضة ، في حين توصل أينشتاين إلى القيمة الصحيحة عندما عزا لكل هزاز قيمة الطاقة الوسطى التي تُحسب من نظرية الكم .

وفي آخر بحث عظيم نشره أينشتاين عن الإشعاع ، وكان في عام 1917 ، أشار إلى خاصتين مهمتين للفوتون كان لهما تأثير عميق في الفيزياء وفي تقنيات الضوء ؛ فقد استنتج فيه صيغة بلانك في الإشعاع من دون أن يرجع إلى إشعاع الجسم الأسود ، بل اكتفى بدراسة إصدار الإشعاع وامتصاصه من قِبَل إلكترونات تصدر الإشعاع وتمتصه بقفزها من مدار إلى آخر بين سلسلة المدارات المنفصلة المباحة ، وفرض أن الإلكترون القافز يمتص أو يصدر في كل قفزة فوتوناً له تواتر معين . كما كان عليه أن يفرض أيضاً ، لكي يكمل استنتاجه لصيغة بلانك بهذه الطريقة ، أن الإلكترون ، علاوة على أنه يقفز تلقائياً من مدار مرتفع (الطاقة) إلى مدار منخفض مطلقاً فوتوناً له تواتر معين ، فإنه إذا مر به فوتونٌ كهذا الفوتون ، قبل أن يتاح له القفز إلى مدار منخفض ، فإن هذا الفوتون العابر يحرضه (يثيره) على القفز (يعطيه دفعة إن صح التعبير) ويجبره على إطلاق فوتون مماثل له يسير في الاتجاه نفسه الذي يسير فيه الفوتون العابر ، ويسير الفوتونان معاً متلازمين تلازماً حميماً . وقد أطلق أينشتاين على ذلك اسم « الإصدار المثار للإشعاع » الذي أصبح أساس أشعة اللازر (أو الليزر) Laser ، وهي تسمية مأخوذة من الأحرف الأولى لكلمات العبارة Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (أي تضخيم الضوء بالإصدار المحفوز للإشعاع) .

وقد أشار أينشتاين أيضاً عند دراسته لإصدار الإشعاع المحفوز إلى أنه من الضروري أن نعزو للفوتون اندفاعاً مثلما عزونا له طاقة ، وذلك لكي نضفي عليه كل صفات الجسيم ، ولكن اندفاع

الفوتون لا يمكن أن يساوي جداء كتلته في سرعته لأنه ليس للفوتون كتلة بالمعنى المألوف للكلمة ، غير أن ذلك لم يكن عائقاً أمام أينشتاين ، فقد عرّف اندفاع الفوتون بأنه يساوي حاصل قسمة طاقته (أي جداء ثابت بلانك في تواتره) على سرعته (أي سرعة الضوء) أو يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على طول موجته . وقد تحقق كومتون Compton فيما بعد بتجاربه الشهيرة ، على انتثار الضوء بالإلكترونات ، صحة هذه الصيغة ، وهذا ما سندرسه فيما بعد .

والحقيقة أن كلاً من نظرية الكم وميكانيك الكم انطلق من صيغة طاقة الفوتون ، أي جداء ثابت بلانك في تواتر الفوتون ، وهي صيغة قُدمت للفيزيائيين كأنها منحة من دون أي محاولة لاستنتاجها من مبادئ أساسية ؛ غير أن واحداً من العلماء المبدعين ، وهو موتْز Motz بيَّن في بحث ، سبق نشره ، بأنه إذا سلّمنا بوجود الفوتون فإنه من الممكن استنتاج صيغة بلانك من الترموديناميك الكلاسيكي ومن مفعول دوبْلر ، فقد تخيل أنه يضغط إشعاعاً (غازاً من الفوتونات) ، داخل وعاء جدرانه عواكس تامة ، بوساطة مكبس يدفعه ببطء باذلاً بذلك عملاً ، فيظهرُ هذا العمل كطاقة داخلية في الإشعاع موزعة بالتساوي بين جميع الفوتونات ، وعندئذ تزداد طاقة كل فوتون بالنسبة المئوية نفسها من طاقته الابتدائية فيما لو دفع المكبس مسافة صغيرة جداً ، ويزداد في الوقت نفسه ؛ بموجب مفعول دوبلر ، تواتر كل فوتون حين ينعكس عن المكبس المتحرك ، فتكون نسبة تزايد التواتر المئوية مساوية تماماً لنسبة تزايد الطاقة المئوية ، ولذلك لا بد أن تكون نسبة طاقة أي فوتون إلى تواتره هي نسبة عامة ثابتة هي التي تعرف باسم ثابت بلانك .

الفيزياء التجريبية في نهاية القرن التاسع عشر

«ليست قيمة المجرب الحقيقية في سعيه وراء ما يبحث عنه في تجربته فحسب، بل وفي سعيه وراء ما لم يبحث عنه».

ـ كلودبرنار*

حدث في نهاية القرن التاسع عشر انقسام طريف بين الفيزيائيين جعلهم فريقين : فريق يعتقد بأن الفيزياء بلغت أو كادت نهاية الشوط ولم يبق ما تفعله من الوجهة الأساسية سوى القليل، وفريق أقلقته بعض الفروق التي لم تكن قد فُسّرت بعد بين النظرية التقليدية والتجربة. وكان المجربون بوجه عام إلى جانب الفئة الأولى، لأنهم كانوا يرون في الفيزياء النيوتنية ونظرية مكسويل الكهرطيسية في الضوء اكتمال الفيزياء النظرية. فالفيزياء في نظرهم، لم تكن، في الأساس، سوى مسألة تجميع بيانات متزايدة الدقة باطراد عن ظواهر يمكن تفسيرها تفسيراً كاملاً بقوانين معروفة. أما الفيزيائيون القلقون أفراد الفئة الثانية فكانوا جميعاً من النظريين، من أمثال بلانك وأينشتاين، الذين كانوا يرون أن في الفيزياء التقليدية تصدعات لا يمكن تفسيرها إلا بأفكار ثورية.

وكان يبدو قبل العام 1900 أن الفيزيائيين القانعين من أصحاب الفئة الأولى هم الذين اتخذوا الجانب الأقوى في النزاع، لأن النجاحات التي حققتها الفيزياء التجريبية كانت مذهلة فعلاً بعد ما تبين أنها جميعاً تلائم النظرية النيوتنية أو النظرية المكسويلية. أما الصعوبات، مثل إخفاق تجربة ميكسون ــ مورلي في كشف حركة الأرض حول الشمس** باستخدام حزم ضوئية، أو مثل

* Claude Bernard (1813-1878) عالم فرنسي في وظائف الأعضاء حقق فيها اكتشافات عديدة واشتهر بأنه مؤسس الطب التجريبي وببحوثه في عمليات الهضم وبتأملاته في فلسفة العلوم وطرائقها.

** لم يكن الغرض من تجربة ميكلسون ــ مورلي كشف حركة الأرض حول الشمس كما ذكر المؤلف بل كشف سرعة الأرض في الأثير كما سيرد في هذا الكتاب نفسه.

الاختلاف بين قياس الحرارة النوعية وحسابها، أو إخفاق الفيزياء التقليدية في تفسير طيف إشعاع الجسم الأسود، أو إخفاق تثاقلية (جاذبية) نيوتن في حساب المدار الصحيح لعطارد. فكانت جميعها تعد قليلة الشأن ولا تمثّل تهديداً وتحدياً للفيزياء التقليدية، ولكن ما أن أشرف عام 1900 على الأفول حتى بدأ بناء الفيزياء التقليدية الفكري الضخم بالتصدع، ثم اكتمل انهياره بعد نحو خمس سنوات حين نشر أينشتاين نظريته النسبوية الخاصة التي فجّرت مع نظرية الكم ثورة في طريقة سبر الفيزيائيين لأعماق الكون. دعونا إذاً نستعرض، قبل دراستنا لنظرية النسبية وكيفية تغييرها للفيزياء ولمفاهيمنا عن الكون، تلك الاكتشافات التجريبية الهامة التي تمت في الربع الأخير من القرن التاسع عشر والعقد الأول من القرن العشرين والتي بشرت بالنظرية الذرية في المادة.

كان عدد من الفيزيائيين والكيميائيين في القرن التاسع عشر قد طوروا نماذج ذرية لتفسير بنية المادة وخواصها، ولم يكن الدليل التجريبي الحاسم على وجود الذرات قد أصبح بعد متيسراً كوجود الإلكترون والبروتون؛ فبين العامين 1802 و1803 نشر الكيميائي البريطاني ج. دالتون **John Dalton** سلسلة من النشرات العلمية التي يقترح فيها فرضية ذرية أدخل فيها مفهوم القوى بين الذرات، فجميع المواد تتألف في نظره من أنواع مختلفة من الذرات (أو الجسيمات الأولية المختلفة الكتل التي تتجاذب فيما بينها وتتحد في أعداد وأنواع مناسبة لتؤلف بذلك كل المركبات المعروفة. غير أن دالتون لم يوضح طبيعة القوى العاملة بين الذرات، لذلك لم تسفر نظريته عن أي تطور جديد، وظلت كأنها أرض جدباء؛ ومع ذلك فقد استخدمها الكيميائيون لتفسير التفاعلات الكيمياوية البسيطة وليدعموا بها المفهوم الجزيئي الذي كان مفيداً جداً في دراسة الغازات. والحقيقة أن جوزيف لويس غاي لوساك الذي اكتشف مع جان ألكسندر سيزار شارل قانون الغازات، بيَّن أن نظرية دالتون الذرية تفسر الجوانب الكمية في تفاعلات الغازات الكيمياوية؛ ففي أي تفاعل كيمياوي بين غازين مختلفين تكون نسبة كميتي الغازين المتحدين لتكوين كمية معينة من غاز ثالث ثابتة دائماً بغض النظر عن كمية الغاز الثالث المتكون؛ وكان هذا يعني لغاي لوساك أن كل جزيء من أي غاز من الغازات الثلاث يتألف من عدد ثابت من ذرات دالتون.

على أن وليم بروت **William Prout** حقق خطوة كبيرة في تطوير فكرة وجود مادة أولية تتألف منها جميع المواد الأخرى؛ ففي بحثين نشرهما في عامي 1815 و1816 اقترح أن جميع الذرات تتألف من اتحاد أعداد مختلفة من ذرات الهدروجين (فرضية بروت)، وكان هذا المفهوم الذي يعطي الهدروجين دوراً أساسياً يستند إلى ملاحظات حققها عدد من الكيميائيين البارعين في طريقة قياس الأوزان (أو الكتل) الذرية للعناصر الكيمياوية المعروفة والتي بينت أن هذه الأوزان كلها تساوي تقريباً مضاعفات صحيحة من وزن الهدروجين الذري؛ لذلك كان هذا الانتظام الضمني في الأوزان الذرية يعني، في نظر بروت، أن لجميع الذرات أساساً مشتركاً هو الهدروجين، وأن هذه الذرات

لا تختلف إلا بعدد ذرات الهدروجين التي تحويها . ولكن هذه الفكرة لم تقبل حالاً على الرغم من جاذبيتها ، فظلت في حقيقة الأمر قابعة في حواشي الفيزياء إلى أن أرست أعمال إرنست رذرفورد ونيلزبور النظرية الذرية على أساس متين .

وقد تم تحطيم أول حاجز في طريق النظرية الذرية على يد ميكائيل فرادي في تجاربه الكهركيمياوية الهامة التي سبق لنا دراستها في الفصل العاشر ؛ فقد أثبتت هذه التجارب بوضوح أن المادة تتألف من جسيمات ثقيلة موجبة (هي نوى الذرات) ومن جسيمات سالبة (هي الإلكترونات الخفيفة) . ولكن الشيء الذي لم يكن واضحاً هو كيف يجتمع هذان النوعان ليكوّنا ذرة . ففكرة الإلكترون نفسه بصفته جسيماً لم تُعرف ولم تنشأ إلا بعد أن عزل السير ج . ج . تومسون شحنة أولية سالبة هي التي دُعيت بعد ذلك باسم « إلكترون » .

أما على الجانب الكيمياوي من النظرية الذرية فقد كان الإنجاز الأهم هو اكتشاف ديمتري مندلييف جدول العناصر الكيمياوية الدوري الذي يُبرز دورية الخواص الكيمياوية للعناصر . ونحتاج لشرح هذا الاكتشاف إلى تعريف العدد الذري والوزن الذري (الكتلة الذرية) اللذيْن يزدادان بدءاً من العناصر الخفيفة إلى الثقيلة . فالعدد الذري لعنصرٍ ما هو الموضع الذي خُصص له في الجدول بدءاً من الهدروجين الواقع في الموضع الأول وعدده الذري 1 ، ثم نتقدم في كل مرة خطوة واحدة حتى أثقل العناصر . فالهليوم يأتي في الموضع الثاني ، أي عدده الذري 2 ، والليتيوم في الموضع الثالث وعدده الذري 3 ، وهكذا .. أما الكتلة الذرية (أو الوزن الذري) لعنصرٍ ما فهي عدد ما تساوي كتلة ذرته من كتلة ذرة الهدروجين الذي خُصَّ بالكتلة الذرية 1 . ويمكن القول بالتقريب أن الكتلة الذرية لعنصرٍ ما تساوي تقريباً ضعف عدده الذري (ويصح هذا في حالة العناصر الخفيفة على الأقل) . وقد اكتشف مندلييف أن الخواص الكيمياوية للعناصر التي تختلف أعدادها الذرية كاختلاف الأعداد : 8, 18, 32 ، ... تتشابه جداً ، ويمكن أن تصنف لهذا السبب في طوائف كيمياوية هي تلك التي يوضحها جدول العناصر الكيمياوية الذي ترتب فيه العناصر بطريقة تجعل العناصر التي تختلف أعدادها الذرية بالأعداد 8, 18, 32 ، ... تقع في عمود واحد ، فهناك عمود الليتيوم والصوديوم والبوتاسيوم ، ... (أي المعادن القلوية) ، وعمود الفلور والكلور والبروم ، و ... (أي الهالوجينات) ، وعمود الهليوم والنيون والأرغون ، و ... (الغازات النبيلة) . وقد كان الانتظام العددي ذا فائدة كبيرة للكيميائيين في نهاية القرن الثامن عشر وبداية القرن التاسع عشر ، كما كان محرضاً للفيزيائيين الذين رأوا فيه دلالة على وجود بنية ذرية من نوعٍ ما ، ولكن لم يكن بإمكانهم حل لغز هذه الدورية الموجودة في جدول مندلييف من دون أي معلومات عن مكونات الذرة الأساسية التي بدأت باكتشاف تومسون للإلكترون عام 1897 .

وكان فرادي قد درس ، في تجاربه الأولى التي ترجع إلى زمن قديم ، أي إلى ثلاثينيات القرن

الماضي، الأشعة المهبطية (الجسيمات التي تصدر عن المهبط، أي المسرى السالب أو الكاتود) في أنبوب مفرّغ كان قد وضع بين مسريين فيه، أي بين المصعد والمهبط فلطية (فرق كمون كهربائي) عالية. وكانت الانبعاثات التي تصدر عن المهبط تسمى الأشعة المهبطية؛ ولم يكونوا يعرفون هل هي أمواج كهرطيسية أم جسيمات. وقد دُرست هذه الأشعة فيما بعد بعناية متزايدة وتقنية معقدة أصبحت متيسرة حين أمكن الحصول على فراغٍ أفضل فأفضل في أنابيب التفريغ.

وقد أثبت تومسون باستخدام أفضل وسائل عصره وأحسن فراغ أمكن تحقيقه أن الأشعة المهبطية هي في الحقيقة جسيمات مادية تحمل شحنة سالبة. وقد لجأ، لتحقيق ذلك، إلى وضع أنبوب الأشعة المهبطية بين لبوسي مكثفة، فلاحظ أن الأشعة المهبطية تنحرف عن اللبوس السالب نحو الموجب، وعندئذ قاس مقدار انحراف الحزمة التي سارت عبر الأنبوب وتبين أن هذا الانحراف يتوقف على سرعة الجسيمات في الحزمة وعلى نسبة شحنة الجسيم e إلى كتلته m، أي على الكمية $\frac{e}{m}$، ثم أحدث حقلاً مغنطيسياً في الأنبوب عمودياً على سرعة جسيمات الأشعة المهبطية المنحرفة، واستطاع أن يجعل الحقل المغنطيسي (الذي يمكن التحكم به بسهولة) قوياً بما يكفي لكي يعيد الحزمة المنحرفة إلى مسارها الأصلي المستقيم. ولما كانت القوة الكهراكدية، التي يؤثر بها لبوسا المكثفة في الجسيمات، تساوي قطعاً في هذه الحالة القوةَ الناشئة عن الحقل المغنطيسي، فقد عادل القوتين وحذف بذلك سرعة الجسيمات، وهكذا لم يبق مجهولاً في معادلته سوى النسبة، أما طول الأنبوب وشدة الحقل الكهربائي وشدة الحقل المغنطيسي فهي كلها معلومة؛ وحصل بذلك على قيمة $\frac{e}{m}$ فكانت أكبر من القيمة $\frac{e}{m}$ التي حصل عليها فرداي في حالة أيون الهدروجين بعامل مقداره نحو 1836. وقد دعا تومسون تلك الجسيمات «إلكترونات». وفي عام 1905 حسب ر. ميليكان Robert Millikan شحنة الإلكترون مستعيناً بتجربة قطرة الزيت الشهيرة، فوجد أنها 4,77 مقسومة على عشرة مليارات ($4,77 \times 10^{-10}$) وحدة كهراكدية؛ فكان عمل تومسون وميليكان أول خطوة في بناء نموذج الذرة الصحيح.

وقد أصبح بالإمكان حساب كتلة الإلكترون بعد أن قيست شحنته e والقيمة $\frac{e}{m}$ التي قاسها تومسون، وذلك بتقسيم أولى الكميتين على الثانية، فوجدت قيمة m بالغرامات 9×10^{-28} أي 9 مقسومة على عشرة آلاف تريليون التريليون، وهذا يعني بعبارة أبسط أن نجمع ما يقارب ألف تريليون التريليون من الإلكترونات لتصبح كتلتها غراماً واحداً؛ فهذا العدد يدل بوضوح على أن الإلكترون لا يساهم إلا بالقليل جداً في كتلة الذرة الكلية أو كتلة مجموعة من الذرات. ولكن الإلكترونات أساسية قطعاً في بناء الذرة الحيادية (أي غير المشحونة)، لأن الإلكترون يساهم بشحنته الكهربائية السالبة في معادلة الشحنة الموجبة في نواة الذرة، وبذلك يجعل الذرة حيادية كهربائياً، هذا فضلاً عن أن الإلكترونات هي التي تحدد، كما سنرى، خواص الذرة الكيمياوية،

فهي التي تسبب التفاعلات الكيمياوية وتتحكم بها.

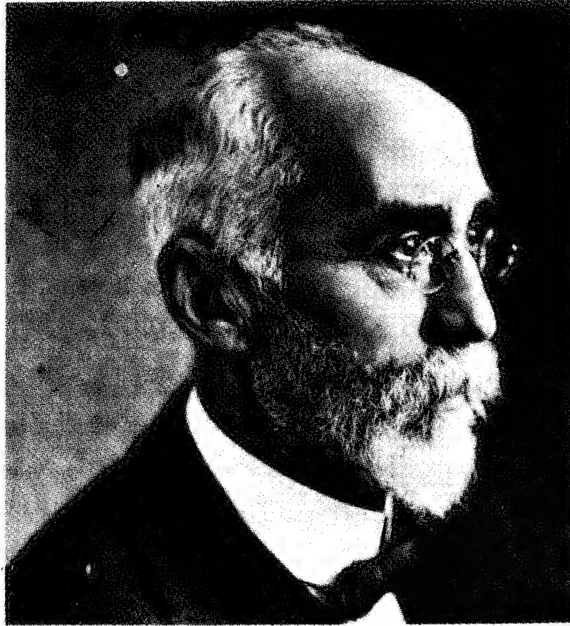
وبعد وقت قصير من اكتشاف أن الإلكترونات هي المكونات السالبة الشحنة للأشعة المهبطية، اكتشف تومسون وآخرون «الأشعة المصعدية»، وهي جسيمات موجبة الشحنة تتحرك في أنبوب الأشعة المهبطية من المصعد إلى المهبط بسرعة أقل بكثير من سرعة الإلكترونات، كما أن النسبة $\frac{e}{m}$ لهذه الجسيمات أقل بآلاف المرات من مثيلتها في الإلكترونات، وتتوقف على طبيعة المصعد وقد كانت أضخم نسبة $\frac{e}{m}$ وجدت للجسيمات المشحونة إيجابياً تأتي من المصعد المكسو بأحد مركبات الهدروجين، أي أن هذه الجسيمات كانت بروتوناً وكتلتها تقرب من 1840 من كتلة الإلكترون ولكن شحنتها الموجبة تساوي بالقيمة شحنة الإلكترون. وقد اكتُشف بعد ذلك أن البروتونات والنترونات هي الجزء المهم في كتل الذرات.

وكان الفيزيائيون النظريون قد بدأوا منذ اكتشاف الإلكترون ببناء نماذج ذرية تفسّر خواص المادة؛ ولكن الصعوبات العسيرة التي بدا منها ما لا يمكن تخطيه كانت تقف حائلاً أمام محاولات كهذه إلى أن بنى نيلزبور نموذج الذرة الشهير الذي يحمل اسمه. وكان الفيزيائي النظري الهولندي العظيم لورنتز قد قام بأكبر عمل نظري مرموق وناجحٍ إلى حدٍ ما، وهو أنه ضمَّن الإلكترون، بصفته مكوناً أساسياً للمادة، فيزياءَ نيوتن ــ مكسويل المعروفة في زمانه. وكان قد بدأ بتغيير (أو توسيع) معادلات مكسويل في الحقل الكهرطيسي (كما غيّر منها في الوقت نفسه الحقلين الكهربائي والمغنطيسي) لتشمل التأثير المتبادل بين الأمواج الكهرطيسية المكسويلية والجسيمات الأساسية المشحونة التي دعاها إلكترونات. وكان هذا العمل الرياضي الفذ قد تم قبل اكتشاف تومسون للإلكترون، لذلك ظل إلكترون لورنتز النظري غير إلكترون تومسون التجريبي حتى قرابة العام 1899؛ ولكن ذلك ليس له أي أهمية مهما بلغت مكانة عمل لورنتز النظري لأن صلاح هذا العمل لا يتوقف على اكتشاف تومسون.

ولد هـ. أ. لورنتز Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) في أرنهيم Arnheim من هولندا، في أسرة لم تظهر أي موهبة خاصة في العلوم. وكان والده يملك دار حضانة ويحاول أن يؤسس أسرة مستقرة عندما توفيت والدة هنريك في عام 1857. وإلى حين تزوج والده ثانية بعد خمس سنوات كان هنريك قد بدأ يُظهر استعداده للعلوم في المدرسة الابتدائية، ثم أصبح طالباً موهوباً في ثانوية أرنهيم حيث ركز على دراسة الكلاسيكيات والرياضيات، وقد انتسب بعدئذ إلى جامعة ليدن في عام 1870 فحصل في العام التالي على درجة البكالورية في الرياضيات والفيزياء، وكان يعطي دروساً ليلية لتأمين موردٍ كافٍ إلى أن حصل على الدكتوراه في الفيزياء وهو في الثانية والعشرين، وكانت أطروحته تبحث في طبيعة الضوء وتشير إلى بداية عمله في البصريات والكهرباء، فقاده ذلك إلى مفهوم الإلكترون.

وفي عام 1878 قبل لورنتز كرسي الفيزياء النظرية في جامعة ليدن واحتفظ به طيلة عمره؛ ونشر في العام نفسه «مقالة عن العلاقة بين سرعة الضوء في وسطٍ ما وكثافته وتركيبه»، وتُعرف هذه العلاقة الآن باسم صيغة لورنتز ــ لورنتز[1]. ودرس معادلات مكسويل في الحقل الكهرطيسي وبحث عن سبل يمكن بها توسيع هذا البناء الرائع ليشمل مجالات أخرى في الفيزياء فهو لم يكن الوحيد في ذلك العصر في اعتقاده أن الوسيلتين معاً: ميكانيك نيوتن ومعادلات مكسويل في الحقل الكهرطيسي كانتا الوسيلتين الوحيدتين اللازمتين لسبر الكون، إذ إنه لم يكن يُعرف في ذلك العصر سوى عاملين في الطبيعة هما الثقالة والكهرطيسية.

وقد ساهم لورنتز مساهمة جوهرية في التحريك الكهربائي (الإلكتروديناميك) للأجسام المتحركة، ولكنه لم يستبعد فرضية وجود أثير يعم كل مكان ويقوم بدور وسطٍ تنتقل فيه جميع الأمواج الكهرطيسية في الفضاء: «فلورنتز هو مصدر مفهوم الإلكترون، إذ إن نظرته بأن هذا الجسم الدقيق المشحون كهربائياً يقوم بدورٍ عند حدوث الظواهر الكهرطيسية في الأجسام المادية هي التي جعلت من الممكن تطبيق النظرية الجزيئية على نظرية الكهرباء ويسرت تفسير سلوك الأمواج الضوئية المارة عبر الأجسام المتحركة الشفافة»[1]. كما وجد لورنتز أيضاً أن القوى الكهرطيسية بين الشحنات يطرأ عليها تغيير عندما تتحرك الشحنات فتسبّب انضغاط الإلكترونات انضغاطاً خفيفاً



هنريك أنطون لورنتز (1853-1928)

هو ما يدعى « تحويل لورنتز » الذي ثبت أنه إحدى نتائج نظرية أينشتاين في النسبية الخاصة[1].

وقد ترأس لورنتز ، إلى جانب عمله النظري ، لجنةً تكونت لدراسة تحركات مياه البحر على طول شواطىء الأراضي المستصلحة حديثاً في بلاده[2] ، وقام في أثناء مهمته الإدارية هذه بعدد من الحسابات التي ظلت ذات قيمة جوهرية في مجال هندسة المائيات (الهدروليكية) ، وتسلم رئاسة مؤتمر سلفي Solvay الذي اتخذ منتدى لكبار فيزيائيي العالم لدراسة الأفكار المستجدة في الفيزياء والتحاور بشأنها . وفي عام 1923 كان أحد سبعة علماء ذوي شهرة عالمية اختيروا لتكوين لجنة التعاون الثقافي الدولية في عصبة الأمم[2] . واستخدم لورنتز نفوذه الكبير في سبيل إحداث منظمة تشرف في الوقت نفسه على البحث العلمي التطبيقي في هولندا وتنسّق برامج البحث القائمة فيها .

لقد وسّع لورنتز معادلات مكسويل بأن ضمّنها حداً ، لكي يصف به التيار المتولد في ناقل (موصل) نتيجة التحريض المغنطيسي ، بأنه تدفق إلكترونات ناشىءٌ عن تأثير قوة الحقل المغنطيسي المتغيّر في إلكترونات الناقل الحرة ، ويدعى هذا الحد الآن « قوة لورنتز » وهو لا يأخذ في الحسبان قوة الحقل الكهربائي المؤثرة في الإلكترون (التي هي قوة كولون نفسها) فحسب ، بل يدخل في الحساب أيضاً التأثير المتبادل بين الحقل المغنطيسي والإلكترون كما سبق أن ذكرنا من قبل . فقد افترض لورنتز أن مقدار هذا التأثير المتبادل المغنطيسي هو جداء ثلاثة حدود : شحنة الإلكترون وحاصل قسمة سرعته على سرعة الضوء وقوة (شدة) الحقل المغنطيسي عند موضع الإلكترون . أما اتجاه قوة لورنتز فهو متعامد مع سرعة الإلكترون ومع اتجاه الحقل المغنطيسي في موضع هذا الإلكترون . ولقد صمدتْ هذه القوة تجاه كل الاختبارات التي مرت بها ؛ ومن المسلم به عالمياً بأنها تصف وصفاً صحيحاً تفاعل الإلكترون مع الحقل الكهرطيسي .

وقد وسع لورنتز نظريته عن الإلكترون لكي يفسر جملةً من الظواهر التي لا يمكن فهمها إلا إذا سلمنا بمفهوم شحنة كهربائية أساسية تدخل في تكوين المادة كلها . وكان أول نجاح حققه لورنتز هو تفسير ظاهرة خطوط طيف الذرات الموضوعة في حقل مغنطيسي والتي تسمى « نموذج زيمَنْ الطبيعي » ، إذ يتألف هذا النموذج من نموذج الطيف العادي (أي بدون حقل مغنطيسي) مصحوباً بخطوط طيفية إضافية قريبة من الخطوط الأصلية ؛ وقد فسر لورنتز هذه الخطوط الإضافية فبيّن أن الحقل المغنطيسي يبدل حركة الإلكترونات التي تولد النموذج الأصلي فتتولد بذلك خطوط جديدة . وقد أكسب هذا النجاح الحافل ، الذي حققته نظرية لورنتز ، مفهوم الإلكترون سحراً واحتراماً هائلين .

وفسّر لورنتز أيضاً بإلكتروناته ظواهر كالناقلية الكهربائية (بأنها إلكترونات تتحرك شبه حرة في الناقل ولكنها لا تتحرك في العازل) ، وكالناقلية الحرارية والإنكسار وانتشار الضوء وخواص أخرى في انتشار الضوء في وسط معين . ولكن ، على الرغم من هذه النجاحات كلها فقد امتنع على النظريين

تصور نموذج صحيح للذرة يضم الإلكترونات والبروتونات. ثم ما إن أشرف القرن التاسع عشر على الأفول حتى جرت بسرعة اكتشافات تجريبية مثيرة.

وكانت إحدى مجموعات هذه التجارب تعالج الأشعة الكهرطيسية النفاذة التي اكتشفها مصادفة و. رُنْتجن Wilhelm Roentgen عام 1895 (الأشعة السينية أو تدعى أيضاً أشعة رنتجن)، ومجموعة أخرى تعالج اكتشاف أ. هـ. بكرِل Antoine-Henri Becquerel عام 1896 الأشعة النشيطة جداً (الكهرطيسية والجسيمات) التي تصدر تلقائياً عن الذرات الثقيلة (النشاط الإشعاعي). وكان رنتجن يعمل وبرفقته عدد من الفيزيائيين التجريبيين الآخرين بأنواعٍ مختلفة من أنابيب التفريغ (لا سيما أنابيب الأشعة المهبطية أو أنابيب كروكس التي اكتشف بمثيلاتها تومسون الإلكترون)، فلاحظ أن قطعة الورق المقوى الأسود، التي غطّى بها الأنبوب والتي هي حاجبة للضوء العادي، كانت شفافة تجاه نوعٍ آخر من الإشعاع الصادر عن الأنبوب. وقد اكتشف هذه الأشعة النفاذة عندما لاحظ أن قطعة ورق مطلية ببلاتينو سيانيد الباريوم يتوضع عليها خط أسود ناتج عنْ شيءٍ ينبعث من الأنبوب سواءً أكان وجه الورقة المطلي هو الذي يواجه الأنبوب أم الوجه الآخر غير المطلي، وفضلاً عن ذلك، فإن الوجه المطلي كان يتأثر بالإشعاع حتى ولو وضعت الورقة على بعدٍ يتجاوز ستة أمتار عن الأنبوب، كما لاحظ رْنتجن أن طبقة بلاتينو سيانيد الباريوم كانت تتوهج متفلورة كلما نشط أنبوب التفريغ (أي أنبوب كروكْس)؛ وقد بيَّن رنتجن أن هذه الأشعة يمكن أن تخترق عدداً من المواد المختلفة، وأن قدرتها على الاختراق تتناقص بسرعة كلما ازدادت كثافة المادة التي تسقط عليها؛ ولاحظ أيضاً أنها تؤيّن الهواء الذي تمر عبْره وتطلق إلكترونات من الذرات التي تلاقيها.

أما ظاهرة النشاط الإشعاعي التي اكتشفها بكْرِل فقد كانت من بعض النواحي تتويجاً لأبحاث ثلاثة أجيال من عائلته في الفصفرة والفلورة، فقد كان جدُّه الفيزيائيُّ أنطوان سيزار الذي حقق عدداً من الاكتشافات المهمة في الكيمياء الكهربائية ومنحته الجمعية الملكية مدالية كوبلي Copley، وكان والده ألكسندر إدمون فيزيائياً شهيراً غزير الإنتاج نشر في مجال دراساته أبحاثاً مفيدة على مدى ما يقرب من نصف قرن[3]. وكان الجد والأب عضويْن في الأكاديمية الفرنسية وشَغل كل منهما في عمله التعليمي كرسي أستاذ الفيزياء في متحف التاريخ الطبيعي، فأصبح ذلك تقليداً ثابر عليه أنطوان هنري وابنه جان بكرِل فيما بعد.

وقد كان من المحتم على هنري بسبب المراكز التي شغلها جده وأبوه أن يتآلف منذ سن مبكرة مع المختبر الذي كان يعمل فيه والده ومع رتابة عمله التعليمي اليومي. وقد ولد هنري في باريس عام 1852 وتلقى تعليمه النظامي الأول في ثانوية لوي لوغران Louis le Grand، ثم انتسب إلى مدرسة البولي تكنيك عام 1872 قبل ذكرى ميلاده العشرين، وبدأ بعد عامين دراستَه في مدرسة الجسور

والطرقات Ponts et Chaussées ، حيث أمضى أربع سنوات وهو يتعلم الرياضيات والهندسة المدنية على أساس كامل فعُيّن في عام 1877 مهندساً في الهيئة الإدارية للجسور والطرقات العامة . أي بعد أن أصبح مدرساً شارحاً (معيداً Démonstrateur) في مدرسة البولي تكنيك بعام واحد . وقبل أن يصبح مساعد عالم طبيعيات aide-naturaliste في متحف التاريخ الطبيعي بعام واحد . ولما كان كلا المركزين مرتبطين ارتباطاً شديداً بالعمل مع والده ، لذلك كان من دواعي السعادة أن يكون شاباً نشيطاً واعياً لنسبه المتميز ومهيأً للقيام بأي مهمة شاقة كان يعدُّها والده ضرورية . ويبدو أن هنري كان يرى بالفعل أن اكتشافه الخاص للنشاط الإشعاعي ما هو إلا نتيجة منطقية لعمل والده ، وكان يعتقد مثل سلفه نيوتن أن إنجازه الخاص يرجع جانب كبير منه إلى أنه استند إلى أعمال الآخرين ، أي إلى والده وجده .

كان بكرل يدرس في بحثه الأول آثار الحقول المغنطيسية في الضوء المستقطب وكذلك امتصاص البلورات للضوء ، وقد مكنته أبحاثه في البصريات من الحصول على الدكتوراه في عام 1888 من كلية العلوم في جامعة باريس ، كما انتخب عضواً في أكاديمية العلوم في العام التالي ، وبعد وفاة والده عام 1891 خلفه في كرسي المتحف وبدأ بإلقاء محاضرات في الفيزياء في مدرسة البولي تكنيك ، كما أنه استمر في الوقت نفسه في عمله مهندساً في الجسور والطرقات ثم عُيِّن في هذه المؤسسة عام 1894 كبيرَ المهندسين .

لم يأت اكتشاف بكرل للنشاط الإشعاعي من العدم بل استمد بواعثه الأولى من اكتشاف رنتجن للأشعة السينية الذي كان قد أُعلن في مطلع عام 1896 ؛ وكان قد تبين من مرور هذه الأشعة عبر الحقلين الكهربائي والمغنطيسي في خطوط مستقيمة بلا انحراف أنها ليست جسيمات مشحونة لأن مسار الجسيمات المشحونة ينحرف في هذين الحقلين عن خطه المستقيم . وقد اكتشف رنتجن نتيجة ملاحظته المتأنية لمصدر الأشعة السينية في أنبوب التفريغ أنها تصدر عن بقعة صغيرة براقة على سطح المعدن تسقط عليها الأشعة المهبطية (أي تصيبها الإلكترونات الآتية من المهبط) ، فكشف بذلك عن سرها ، وكان يتفق اتفاقاً تاماً مع نظرية مكسويل الكهرطيسية ونظرية لورنتز عن الإلكترون اللتين تطلق الجسيمات المشحونة بموجبهما أمواجاً كهرطيسية عند إبطائها ، وهذا ما يحدث عندما تصيب الإلكترونات سطح المعدن فتشع طاقتها على صورة أشعة كهرطيسية .

ويستطيع المرء أن يحسب بسهولة ، بالاستفادة من نظرية الكم ، طاقة الأشعة السينية الصادرة (أو تواترها) ، فإذا حول الإلكترون كامل طاقته الحركية عند اصطدامه في مساره بسطح المعدن إلى كم طاقة واحدة (أي فوتون أشعة سينية) فعندئذ يمكن حساب تواتر هذا الفوتون بتقسيم طاقة الإلكترون الحركية على ثابت بلانك h (وليس ذلك من بعض النواحي سوى مقلوب المفعول الكهرضوئي ، إذ تولد الإلكترونات هنا عندما تصدم سطح المعدن فوتونات بدلاً من أن تولد



أنطوان هنري بكرل (1852-1908)

الفوتونات إلكترونات) .

إن هذه العلاقة الكمومية البسيطة بين تواتر فوتون الأشعة السينية والطاقة الحركية للإلكترون الذي يولده ، (طاقة الفوتون تساوي جداء تواتره في ثابت بلانك) يمكن أن يستفاد منها في تعديل طاقة الأشعة السينية الناتجة بأن تُعدَّل طاقة الأشعة المهبطية التي تولدها وذلك بتغيير التوتر الكهربائي بين مربطي أنبوب التفريغ .

وقد دفع اكتشاف رنتجن للأشعة السينية ببكرل إلى القيام بسلسلة من التجارب على الجزيئات المفلورة التي إما أن تكون متفلورة بطبيعتها أو نتيجة امتصاصها لأشعة الشمس . ومع أن هذه الظواهر كانت معروفة إلا أن آليتها كانت مجهولة تماماً ، ففكر بكرل بأن هذه الآلية ربما تكون مرتبطة بطريقة ما بتوليد الأشعة السينية ، لأن رنتجن كان قد تحدث عندما وصف مشاهدته للأشعة

السينية عن تفلور الطلاء بلاتينو سيانيد الباريوم، ولذلك افترض بكرل أن الأشعة السينية ترتبط بالفلورة بطريقةٍ ما. ولكن فكرة هذا الافتراض، على الرغم من خطئها، دفعت إلى القيام بسلسلة من المشاهدات أدت إلى اكتشاف النشاط الإشعاعي.

وكان بكرل قد قام مسبقاً ولعدة سنوات بأبحاث في الفصفرة والفلورة (ومن المألوف أن يُبادل بين التعبيرين)، كما كان يعتقد بأن المواد المفصفرة إذا ما عولجت كهربائياً أو عُرِّضت لأشعة الشمس بصورة مناسبة، فإنها تولِّد أشعة سينية، إلا أن اختبار عددٍ من مواد كهذه لمدة أسابيع أظهر أن لا وجود لأشعة سينية؛ لكن بكرل لم يكف عن اختباراته فكوفىء أخيراً على مثابرته عندما قام بتجربته على أحد مركبات اليورانيوم ــ ثنائي سلفات أورانيل البوتاسيوم المتبلور ــ فقد وضعه فوق لوح تصوير حساس حماه من أشعة الشمس بطبقتين سميكتين جداً من الورق المقوى، ثم وضع كل هذه الأشياء معاً في ضوء الشمس الساطعة لكي يحث على عملية الفلورة في البلورة، فاكتشف أن قسماً من لوح التصوير الحساس الذي وضع فوقه بلورة المركب قد اسودّ بأشعة كانت قد عبرت صفيحتيْ الورق المقوى الذي لُفّ به لوح التصوير الحساس. وقد قبل بكرل بهذه النتيجة بصفتها سنداً قوياً لفرضه غير الصحيح بأن الفلورة أو الفصفرة هي التي ولدت هذه الأشعة النافذة الشبيهة بأشعة رنتجن. إلا أنه اكتشف بعد أيام قليلة، لدى فحص لوح تصوير آخر كان قد وُضع في درجٍ قرب بلورة ثنائي سلفات أورانيل البوتاسيوم التي لم تكن تعرّضت لأشعة الشمس بل وضعت في الدرج بانتظار يوم مشمس، اكتشف أن لوح التصوير اسودّ مثلما حدث في تجربته السابقة، فأدرك بكرل مباشرة أن الفصفرة أو الفلورة لا علاقة لها بالأشعة الصادرة عن بلوراته، فتتبع بعد ذلك أثر إشعاعات ذرات اليورانيوم في البلورة. وأخيراً توج عمله الاستقصائي باكتشافه نشاط الذرات الثقيلة الإشعاعي؛ غير أن ما كان يُعرف عن بنية الذرة كان قليلاً جداً، لذلك لم يكن هناك ما يقال عن الطريقة التي تولِّد بها الذرات أشعة بكرل وتُرك أمر هذا الاكتشاف للورد إرنست رذرفورد. ولما لم يُثر اكتشاف بكرل أي ضجة كبيرة في الدوائر العلمية، فقد فَقَدَ بكرل اهتمامه بهذا الأمر ومضى في أبحاث أقل أهمية من غير أن يفهم طبيعة اكتشافه الثورية.

وكانت موهبة بكرل تقوم في الدرجة الأولى على الفيزياء التجريبية، وربما كان خير ما يمثلها مقدرته على تنفيذ التجارب المملة، لذلك قاوم كل إغراء لوضع تفسير نظري لظاهرة النشاط الإشعاعي، وفَضَّل أن يترك هذه المهمة لغيره. ولا أحد ينكر وجود علاقة متبادلة بين النظرية والتجربة، ولكن يبدو أن بكرل لم يتوسم أنه قادر على صياغة أساس عقلي يفسر به نشاط الجسيمات الإشعاعي. ومهما يكن من أمر فقد نال اكتشافه أخيراً الاعتراف العلمي الذي يستحقه، إلا أن هذا الاعتراف لم يحدث إلا بعد أن بيَّن بيير وماري كوري أهمية النشاط الإشعاعي في الفيزياء النووية، فمنحت الجمعية الملكية بكرل مدالية رمفورد Rumford، واختارته عضواً أجنبياً

فيها في عام 1900 . كما نال دكتوراه شرف من جامعتيْ أكسفورد وكمبردج وشارك كوري وزوجته في جائزة نوبل في الفيزياء عام 1903 « فكان ذلك توزيعاً ملائماً ، لأن أبحاث بكرل الطليعية مهدت السبيل أمام اكتشافات الزوجين كوري وقد صادقت هذه الاكتشافات على اكتشافه وأظهرت أهميته » . على أن بكرل نال أقصى ما يمكن أن يناله من تكريم شخصي حين أصبح رئيساً لأكاديمية العلوم في عام 1908 ؛ ولكنه لم يتمتع بمنصبه إلا لبضعة أشهر فقد توفي بإصابة قلبية في 25 آب / أغسطس عام 1908 حين كان يقضي عطلته في كروازي Croisic في بروتانية في فرنسا .

وعلى الرغم من أن عمل بكرل في النشاط الإشعاعي لم يترك في البداية أثراً كبيراً عند الفيزيائيين الأساسيين المشهورين فقد حث اثنين من ألمع أفراد جيل الفيزيائيين الشبان وهما ماري كوري وإرنست رذرفورد على مواصلة هذا العمل . أما ماري كوري Marie Sklodowska Curie (1867-1934) فقد ولدت في وارسو في بولونيا ، وكان والدها يعلم الرياضيات والفيزياء في إحدى الثانويات الحكومية ، وأما أمها فكانت تدير مدرسة داخلية للفتيات . وعلى الرغم من ساعات والديها الطويلة في العمل فإن ما كان لديهم من المال يكاد يكفي بصعوبة لسد حاجيات المنزل ، ذلك لأن والد ماري كوري كان محروماً بسبب معتقداته السياسية من المطالبة بالمراكز التعليمية المجزية ، ولم يكن بمقدور الأسرة الحصول على العناية الطبية الحسنة بسبب عجزها المالي فماتت صوفيا كبرى أخوات ماري بالتيفوس عام 1876 ، كما ماتت والدتها بعد نوبة سل طويلة بعد ذلك بعامين[2] .

وكان والد ماري مضطراً لأن يؤوي بعض النزلاء لكي يجني المزيد من المال ، لذلك كانت تنام ماري غالباً في غرفة المعيشة ، فلم تكن ظروف دراستها على ما يرام ، ومع ذلك كانت طالبة مجدّة فازت عندما كانت في المدرسة الثانوية بالجائزة الذهبية في اللغة الروسية ، على الرغم من أن الحكومة القيصرية كانت مسؤولة عن سياسة الكبت في بولونيا في ذلك الوقت . وقد أكملت ماري تعليمها النظامي بقراءة بعض المؤلفات الأدبية والسياسية لكتّاب مختلفين من دستوفسكي حتى ماركس[3] . وفي عام 1886 عملت ماري مربية لأطفال مدير الصحة البولونية الذي كان يقيم بالقرب من بزاسنيز Pzasnysz وذلك لكي تدفع لأختها برونيا Bronia تكاليف دراستها في فرنسا . وبعد ثلاثة أعوام عادت إلى وارسو لتكون قريبة من أسرتها ، وفي أثناء ذلك نما لديها اهتمام بالكيمياء . وحين أصبحت أختها برونيا دكتورة في الطب في فرنسا ألحت على ماري بأن تأتي إلى باريس ، لذلك حزمت ماري أمتعتها القليلة ورحلت بالقطار إلى فرنسا في عام 1891 ، وهناك نالت منحة لدراسة الرياضيات والفيزياء في الصوربون . وعلى الرغم من أنها كانت تقيم في البدء مع أختها وزوج أختها فقد وجدت أن المسافة الطويلة التي عليها اجتيازها للوصول إلى الصوربون وانقطاعها المتكرر عن دراستها في منزل أختها أوجبتا عليها استئجار غرفة صغيرة بالقرب من الجامعة . وكان عليها أن تعيش بمبلغ زهيد قدره 100 فرنك في الشهر ، لذلك كانت غالباً ما تذهب من دون طعام أو فحم لموقدها حتى في أبرد



ماري سكلودوفسكا كوري[1] (1867 - 1934)

أشهر الشتاء ؛ وقد أُغمي عليها من الجوع في أكثر من مرة ، كما كانت تعاني بسبب سوء التغذية من أمراض مختلفة ، إلا أنها على الرغم من مصاعبها الشخصية ، تابعت دراساتها بجهد عقلي فريد ونجحت في فحوص الليسانس المرهقة في الفيزياء والرياضيات بدرجة الشرف في عام 1893 و1894 على التوالي . وفي ذلك الوقت التقت ببيير كوري الذي كان قد حقق لنفسه شهرة ببحثه في الظواهر المغنطيسية واكتشافه « الكهرباء الضغطية Piezoelectricity » ، وكان يعمل رئيساً لمختبر مدرسة الفيزياء والكيمياء في باريس ، فتزوجا بعد عام وانضمت ماري إلى زوجها في مختبره . وكانت قد سمعت عن أعمال بكرل فقررت أن تهب حياتها لدراسة النشاط الإشعاعي . وكان زوجها يدعمها في هذه الجهود وباشرا تحريات منظمة عن النشاط الإشعاعي والعناصر الثقيلة ، ولم يكتفيا بتثبيت اكتشافات بكرل بل حققا أيضاً بعض الاكتشافات الهامة الجديدة ، منها مثلاً أن نشاط أكسيد التوريوم الإشعاعي أشد من نشاط معدن اليورانيوم لكل غرام منهما وأن شدة الأشعة الصادرة تزداد مع ازدياد تركيز اليورانيوم أو التوريوم في المركب ، ولكن لا على صورة تناسب . وقد حيَّر عدم التناسب

هذا الفيزيائيين لبعض الوقت إلى أن وجدوا الجواب الصحيح ــ وهو أن بعض الأشعة الصادرة عن نشاط ذرةٍ ما تمتصها ذرات أخرى في المعدن سبق لها أن أطلقت أشعتها ، كما أثبت الزوجان كوري أيضاً إثباتاً قاطعاً أن النشاط الإشعاعي سيرورةُ ذرات فردية لا سيرورةٌ إجمالية ، إذ تطلق كل ذرة شعاعاً واحداً لا أكثر ، ولذلك فإن النشاط الإشعاعي هو خاصة ذاتية للذرة .

على أن أعظم نجاح حققه الزوجان كان اكتشافهما نشاط الراديوم الإشعاعي وعزلهما هذا العنصر عن فلز البتشبلندْ **Pitchblende** ، فقد لاحظت ماري كوري أن هذا الفلز ، أي فلز أكسيد اليورانيوم ، كان نشاطه الإشعاعي يفوق كثيراً نشاط كمية مساوية من اليورانيوم الصرف ، لذلك استنتجت أن البتشبلند يحوي عنصراً أشد نشاطاً بكثير من نشاط اليورانيوم الإشعاعي ، وقد تحققت بمساعدة بيير من صحة تخمينها بأن عزلت الراديوم عن البتشبلند في عام 1898 ، فكان ذلك حدثاً خطيراً تمخض عن ولادة علم الكيمياء الإشعاعية .

وقد أجرى الزوجان كوري عملهما في ظروف صعبة لا يمكن أن يقدِّر صعوبتها كيميائي يعمل في مختبر حديث ، إذ كانت أبحاثهما عن اليورانيوم والراديوم تحتاج إلى عزل كلٍ من العنصريْن وتعيين وزنيهما الذريين ؛ وهذه مهمة لم تكن لتنجز إلا بمعالجة أطنان من فلز البتشبلند . وكان على الزوجين ، بعد معالجة هذا الفلز ، أن يقوما بعددٍ من البحوث الكيمياوية ، ولكن عدم وجود مكان في المختبر كان يعني أن عليهما أن يؤسسا مختبراً موقتاً في سقيفة خشبية مهجورة كانت في فناء على مقربة من المختبر الذي كانت ماري تستخدمه سابقاً « ففي هذا المكان الخانق في الصيف والبارد الصقيعي في الشتاء كان على الزوجين المتفانيين الممتلئين حماساً أن يواظبا مدة خمسة وأربعين شهراً ، تكاد تكون بلا انقطاع ، على تحضير عينة من كلوريد الراديوم وأن يعينا وزنه الذري »[7] ، فأنهكهما الجهد الجبار ولا سيما منذ أن كان عليهما القيام بواجبات التعليم الإضافي في ذلك الوقت لدعم دخلهما الهزيل[7] . ولم تكن ماري تدرك آنئذ أن فقر الدم الدائم عندها والإعياء الجسدي كانا نتيجة تعرضها لتأثيرات الإشعاع الموهنة .

وعلى الرغم من أن ماري .كانت قد بدأت بحثها في النشاط الإشعاعي لإتمام متطلبات الدكتوراه في الصوربون ، فقد أهملت المضي في شكليات طلب هذه الدرجة ؛ ولكن فضلها المبين في بحثها أقنع الإداريين بأن يتساهلوا في المتطلبات الرسمية ، فهُيِء لها امتحان الدكتوراه في حزيران / يونيو عام 1903 ، ثم منحوها الدرجة بعد ذلك فوراً . والأهم من ذلك كله هو أنه لم تمضِ سوى ستة أشهر على منحها الدرجة حتى شاركت زوجها كالعادة وهنري بكرل بجائزة نوبل في الفيزياء للعام 1903 ؛ إلا أن المرض منع ماري وبيير كليهما من السفر إلى استوكهلم للاحتفال الرسمي هناك . ولكن رحيلهما إلى ستوكهلم لم يكن مؤكداً ، حتى لو كانا معافيين ، لأنهما كانا يمقتان الاستقبالات والواجبات الاجتماعية لاعتقادهما بأنها إلهاء غير مبرَّر عن عملهما في المختبر .

ثم شهدت الأعوام القليلة التالية استمرار الزوجين في تحرياتهما عن خواص الراديوم. وفي عام 1905 خُصص لبيير في الصوربون كرسي جديد للفيزياء ثم انتخب حالاً بعد ذلك عضواً في أكاديمية العلوم، ولكن لم يتح له لسوء الحظ، أن يسعد طويلاً بمنزلته الرفيعة الجديدة، فقد قتلته عربة خيول شاحنة في 19 نيسان/أبريل عام 1906 عندما كان يحاول اجتياز أحد الشوارع في طقس عاصف. فحمَّل ماري موتُه، وهو في السادسة والأربعين، أعباءً تزيد على أعبائها، وكان عليها أن تربي وحدها طفلتيها الصغيرتين.

وكانت مواقف العديد من أعضاء الكلية في الصوربون محافظة، إذ كانوا يتساءلون هل يمكن أن تصلح أي امرأة لتكون أستاذة للفيزياء؛ وعلى الرغم من ذلك، اختيرت ماري بتصويت مجلس الكلية بالإجماع لتخلف زوجها في كرسيه في الصوربون حيث تابعت عملها في المختبر[5]، فكان تعيينها حدثاً تاريخياً لأنه لم يسبق أبداً أن اختيرت امرأة لتعلّم في الصوربون، ولكنها لم تكن سعيدة بقاعة محاضراتها لاعتقادها بأنه كان من الأنسب لها أن تجري تجارب في المختبر، ومع ذلك فقد تضافر إجراؤها التجارب الإيضاحية مع شهرتها العالمية في ضمان شعبية محاضراتها.

ولم تتوقف ماري عن تفانيها في سبيل العلم فتنازلت عن مكافأة وسام جوقة الشرف في عام 1910 إذ سبق لها أن حازت على منحة من وزارة التربية[6]. وكانت قد أُقنعت بأن ترشح نفسها لعضوية أكاديمية العلوم، ولكن إحدى المقالات الصحفية المخزية ادعت بأنه كانت لها علاقة (غرامية) مع أحد المعيدين، فأدى ذلك إلى رفض طلبها وقبول عالمٍ آخر غير متميز نسبياً بدلاً عنها[6]. ولكن ماري الشجاعة حولت اهتمامها للإعانة في تأسيس معهدٍ للراديوم ووضْع قياسات معيارية له. وقد كلفها مؤتمر المعالجة بالإشعاع، الذي أقيم في بلجيكا عام 1910، بمهمة استخلاص 20 مليغراماً من معدن الراديوم كي تودع في مكتب الموازين والمقاييس في باريس[6]. كما أحيا هذا المؤتمر ذكرى زوجها بأن أطلق اسم كوري على وحدة قياس الإشعاع الصادر عن الراديوم[6].

وفي عام 1911 نالت ماري جائزة نوبل في الكيمياء لتصبح أول إنسان ينال جائزة نوبل مرتين، وقد استُخدم معظم المال لتمويل مشاريع بحوث علمية. وفي عام 1914 تألفت هيئة معهد الراديوم التي اكتمل بناؤها بعد ذلك في العام نفسه[6]، فعملت فيها ماري عضواً، ولكنها وجدت أن الإداريين غير متعاطفين مع العديد من مشاريع البحوث التي اقترحتها. وعلى الرغم من أنها كانت رقيقة الحديث وتكاد تكون متحفظة مع غير العلميين فقد أقنعها اندلاع الحرب العالمية الأولى والإصابات الكبيرة في جنود القوات الفرنسية، الذين تحملوا وطأة الغزو الألماني في شمالي فرنسا، بأن توجه التماساً عاماً لرصد مبالغ لتجهيز سيارات إسعاف في ميدان المعركة مع فريق للمعالجة بالأشعة؛ وقد نجحت جهود التمويل واختيرت ماري من قبل الصليب الأحمر لتكون الرئيس الرسمي لمصلحة المعالجة بالأشعة، كما خصّصت ماري بمعونة ابنتها إيرين دروساً متقدمة في الطب

الإشعاعي ، وعلمت الأطباء تقنيات جديدة لزرع أشياء غريبة في جسم الإنسان[6] .

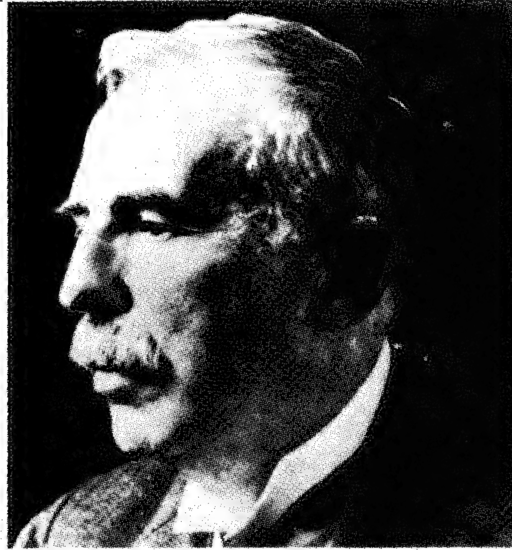
وفي أعقاب هدنة عام 1918 بدأ معهد الراديوم عمله وانضمت ماري إلى هيئة أساتذته ، ثم أتت حملة جمع تبرعات خاصة في الولايات المتحدة في عام 1921 بما يكفي من المساهمات لشراء غرام واحد من الراديوم قدمه الرئيس و . ج . هاردِن Warren G.Harding رسمياً لماري عند زيارتها للولايات المتحدة في ذلك العام[7] . وعلى الرغم من أن ماري لم تكن تعبأ بالإعلام الذي كان يلاحقها منذ نالت جائزة نوبل الأولى فإنها تأثرت تأثراً عميقاً بهذه الهدية التي حض على تقديمها أحد الصحفيين الذي كان معجباً بشعور الإخلاص والإحساس بالمصلحة الوطنية لدى ماري[7] .

وقد أمضت ماري السنوات الباقية من سيرتها العلمية وهي تشرف على توسيع هيئة مدرسي معهد الراديوم الذي ضم 17 قومية مختلفة منذ عام 1933[7] ، ومع ذلك فقد كانت ملزمة على الانقطاع عن واجباتها بسبب سوء صحتها ، فقد خضعت لأربع عمليات استئصال الساد (إعتام عدسة العين) ، وغالباً ما كانت تعاني من جروح في أصابعها . ونظراً لعدم قدرتها على العناية بنفسها بصورة ملائمة ، فقد دخلت مصحاً في باريس[7] . واستمرت صحتها بالتدهور ثم رقدت بسلام في 4 تموز / يوليو عام 1934 . وعلى الرغم من كثرة آيات التكريم والثناء التي قُدمت لها بعد موتها فلربما كانت كلمة أينشتاين أكثر تأثيراً من غيرها ، فقد كتب « إن قوتها ونقاء إرادتها وتقشفها نحو نفسها وموضوعيتها وصحة أحكامها التي لا تخطىء ، كل ذلك كان من نوع يندر أن نجده مجتمعاً في شخص واحد ... وإن أعظم عمل علمي في حياتها ، وهو إثبات وجود العناصر النشيطة إشعاعياً وعزلها ، يعود إنجازه لا لإلهامها الجريء الجلي فحسب بل لتفانيها ودأبها على تنفيذه في أقسى الظروف الخارجية التي يمكن تصورها ، فمثل ذلك لا يحدث غالباً في تاريخ العلم »[8] .

كانت ظواهر النشاط الإشعاعي التي كشفتها أبحاث الزوجين كوري تبدو غير مترابطة فأتى إرنست رذرفورد Ernest Rutherford (1871-1937) ونظم تشوش هذه الظواهر فأصبح واحداً من أعظم الفيزيائيين التجريبيين في كل العصور . وكان قد ولد في برايْت ووتر Brightwater بالقرب من نلْسون في الشاطىء الشمالي من الجزيرة الجنوبية نيوزيلندا ، وكان الرابع بين 12 ولداً ، وأبواه من الجيل الأول من النيوزيلنديين حملاهما أبواهما من اسكتلندا إلى هذه الجزيرة حين كانا طفلين ، وعندما كان إرنست في الرابعة انتقلت الأسرة مسافة 12 ميلاً إلى مدينة فوكْسهيل حيث تلقى تعليمه الابتدائي المبكّر ، وظلت الأسرة في فوكسهيل حتى عام 1882 ، فانتقلت عندئذ إلى مدينة هيفْلوك حيث حصل إرنست على منحة أكاديمية هيأت له إمكان الانتساب إلى كلية نلسون[9] . ومع أن رذرفورد كان مهتماً بوجه خاص بالعلم والرياضيات ، فإنه تفوق في كل الموضوعات فأكسبته كفاءته الأكاديمية في نلسون منحة في كلية كانْتَرْبري في كريسْت تشِيرْش في نيوريلندا ، حيث حصل على الشهادة الثانوية ودرجة الماجستير معاً ، وكانت الأخيرة بدرجة الشرف في الرياضيات والعلوم

الفيزيائية[10]. وفي أثناء ذلك صنع بجهده الشخصي جهازاً في مسكنه الأرضي واستقصى به انتشار الأمواج الكهرطيسية. وقد نال فضلاً عن ذلك منحة لمدة سنتين في كمبردج لكي يدرس بصفة باحث مساعد. وكان يستخرج البطاطا من الحقل عندما أبلغته أمه بأنه حصل على المنحة، فما أن سمع النبأ حتى أطاح بالرفش جانباً بحركة مدوّية وصاح «هذه آخر حبة بطاطا أستخرجها»[10].

بدأ رذرفورد عمله على الأشعة السينية في عام 1896 بصفة باحث مساعد لتومسون في مختبر كافندِشْ، وكان مهتماً، بوجه خاص، بتأين الذرات بالأشعة السينية وعودة هذه الذرات للاتحاد مع الإلكترونات الحرة، لذلك كان أمراً طبيعياً تماماً أن يدرس خواص أشعة بكرل المؤينة، فكان أهم اكتشافاته في النشاط الإشعاعي نابعاً من هذه الأعمال، فقد بيَّن في أول الأمر أن أشعة بكرل (أي الإشعاع الصادر عن نشاط الذرات الإشعاعي) ليس متجانساً بل يتألف من مركبتين مختلفتين على الأقل، دعاهما «أشعة ألفا α» و«أشعة بيتا β»؛ أما جسيمات ألفا فهي المركبات الموجودة في الإشعاع الصادر عن اليورانيوم. وقد تبين له أن أشعة ألفا أقل نفاذاً بكثير من أشعة بيتا، وأن كلا الإشعاعين يتألفان من جسيمات مشحونة. ثم أثبت بعد ذلك أن أشعة بيتا هي إلكترونات وأن أشعة ألفا هي ذرات الهليوم المشحونة إيجابياً (والمضاعفة التأين) أي هي نوى الهليوم، أما اختلاف سرعة انطلاق أشعة ألفا عن سرعة أشعة بيتا فهو ناجم عن اختلاف كتلتيهما، إذ تقرب كتلة جسيم ألفا من 8000 مرة من كتلة جسيم بيتا وقد استنتج رذرفورد، من دراسته سلوك جسيمات ألفا وبيتا في



السير إرنست رذرفورد (1871-1937)

الحقلين الكهربائي والمغنطيسي، شحنة كل من الجسيمين الكهربائية، فكانت نتائجه قريبة جداً من القيم المقبولة حالياً.

أمضى رذرفورد عدة سنوات وهو يعمل مع تومسون في كمبردج، وفي عام 1898 عُرض عليه مركز أستاذ في جامعة ماك جيل في مونتريال في كندا، فقبل العرض، على الرغم من بعض الهواجس التي ساورته وهو يغادر ما كان على الأرجح أفضل مختبر في العالم،ويفارق مرشده تومسون الذي كان يُعد آنذاك من بين أشهر الباحثين في الظواهر الذرية. وما أن بدأ رذرفورد عمله في ماك جيل حتى اكتشف أن نشاط التوريوم الإشعاعي يتناقص تناقصاً أسّياً مع الزمن[11]. والتقى في ذلك الحين بكيميائي موهوب عمل حديثاً معيداً Demonstrator في قسم الكيمياء، وهو فريدريك سودي Frederick Soddy، فلم يلبث أن أكد بمعونته أن الذرات ليست مستقرة كما كان يفترض الكيميائيون منذ أمد بعيد، وأن العناصر النشيطة إشعاعياً تمر، كما يستدل من صدور الإشعاع منها، بسلسلة من التحولات[12]. وقد توصل رذرفورد وسودي، بعد سلسلة من التجارب على نترات التوريوم، «إلى نتيجة عامة وهي أن النشاط الإشعاعي ليس سوى تجلٍ لتبدلٍ دون الذري ــ وهذه النتيجة فيها معالم التنبؤ ــ لأن رذرفورد سيفترض بعد تسع سنوات من هذا التاريخ نموذج الذرة النووية»[13]. وهكذا أثارت تجارب رذرفورد وسودي ثورة في الكيمياء، إذ إنها، بإثباتها أن كل العناصر النشيطة إشعاعياً تخضع تلقائياً للتحول إلى عناصر جديدة، أبطلت وجهة النظر الراسخة عن المادة (أي العناصر) بأنها غير قابلة للتحول.

ولكن رذرفورد كان يشعر، على الرغم من أهمية عمله في جامعة ماك جيل، أنه معزول إلى حدٍ ما عن العمل المهم الجاري آنذاك في فيزياء الذرة، لذلك ما أن عُرض عليه تسلم رئاسة قسم الفيزياء في جامعة منشستر عام 1907، بعد أن تقاعد آ. شوستَر A.Schuster[14]، حتى قبل بذلك حالاً، وبدأ بعد وصوله إلى هناك، في نهاية هذا العام، أبحاثه في الفيزياء الذرية التي توّجها باكتشافه نواة الذرة. وكان من أعظم إنجازاته أيضاً في منشستر، إثباته أن جسيمات ألفا هي في حقيقة الأمر ذرات هليوم متأينة، وهذه فرضية سبق أن وضعت قبل ذلك بسنوات، ولكنها أعيت جهود كثير من العلماء في أن يجدوا لها إثباتاً تجريبياً مباشراً إلى أن جاء عمل رذرفورد الخاص في منشستر[14]، فاتسعت شهرته في أنه فيزيائي مجرّب، حتى لقد انهال عليه الطلب آنذاك لأن يحاضر، سواءً أمام العلميين أو عامة الناس، فكان يجد قائمة الطلبات مجهدة في بعض الأحيان. وعلى الرغم من ذلك، كان يرحب بهذه المناسبات لكي يُطْلع زملاءه والجمهور العريض على ما يتم من اكتشافات ثورية في ميدان الذرة. وكانت أشهر محاضراته هي التي قدمها في عام 1904 عندما زار الجمعية الملكية في لندن، وبرهن باستخدام قياسات التفكك الإشعاعي أن عمر الأرض ليس تلك الملايين القليلة من السنين التي افترضها اللورد كلفن، بل هي تبلغ عدة مئات الأضعاف من ذلك

على الأقل[15]. وكان تقدير كلفن يفترض أن مصدر طاقة الشمس هو الحرارة المتولدة من انكماشها التثاقلي، ولكن رذرفورد بيَّن أن ذلك غير ممكن، لأن توليد الطاقة على هذا النحو لا يكفي لأن تستمر الشمس في اشتعالها مدة تساوي ما قدره رذرفورد نفسه لعمر الأرض الذي بناه على معدل تفكك العناصر المشعة.

كان وصول رذرفورد إلى منشستر بداية أعظم مرحلة منتجة في مسيرته العلمية، فقد نشر من قبْل ما يقرب من 50 بحثاً مهماً وأُقر له بأنه فيزيائي لامع، ولكنه لم يكن راضياً عن توقفه عند إنجازاته السابقة[16]، فانغمس في بحوثه وواجباته التعليمية بحماس كان يتجدد ويقوى بالمناقشات التي تدور يومياً تقريباً، بينه وبين فيزيائيين وكيميائيين جديرين بالاهتمام، فلم يمض عام على وصوله إلى منشستر حتى منحته أكاديمية تورنتو (إيطاليا) للعلوم جائزة بريسا Bressa لإثباته قابلية تحول المادة (العناصر)، كما منحته كلية ترينيتي في دبْلن درجة شرف[17]. أما أعظم تقدير فقد أتى بعد ذلك في عام 1908 عندما مُنح جائزة نوبل للكيمياء ـــ وهي منحة رأى رذرفورد أنها مزعجة ومضحكة في وقت واحد، لأنه كان يرى نفسه فيزيائياً.

لقد اقتنع رذرفورد من بحوثه على فصيلة من العناصر المشعة هي فصيلة الثوريوم، أنه يمكن استخدام الجسيمات ألفا الصادرة عن التفكك الإشعاعي في سبر باطن الذرة ودراسة بنيتها[17]. وكانت تجاربه الخاصة قد أثبتت أن الذرة تتألف بأكملها تقريباً من فضاء فارغ، كما وجد أن عمل هـ. غيْغر Hans Geiger عن تبعثر جسيمات ألفا حاسمٌ فيما يتصل بصياغته لنموذج الذرة، وهو أنها تتألف من نواة مشحونة إيجاباً[18]. فقد دلت تجاربه بخصوص تبعثر جسيمات ألفا على وجود طاقة هائلة مكبوتة داخل كل ذرة بمفردها، كما بينت له قياساته أن نواة الذرة متراصة جداً فقطرها يقارب $3x10^{-10}$ سم، وهكذا تمثل هذه النتائج بداية ما يُعرف اليوم بنموذج الذرة النووية[18].

وفي عام 1914 اعترفت السلطة الملكية رسمياً بإنجازات رذرفورد العلمية فمنح لقب سير Sir، وكان لا يزال شاباً نسبياً، لذلك كان يرتبك إلى حدٍ ما حين ينادى «سير إرنست رذرفورد»، ومع ذلك فإنه قَبِلَ المنحة بيسر من دون تردد مثلما فعل حين نال جائزة نوبل قبل ذلك بست سنوات. واستمر رذرفورد في بحوثه الخاصة وقام في أثناء ذلك بمراسلات واسعة مع علماء آخرين مثل أ. هان Otto Hahn و ل. ميتْنر اللذين كانا يدرسان طبيعة أشعة غاما[19]. وكان يشرف أيضاً على التجارب المتزايدة التنوع التي ينفذها مساعدوه في البحث، على الرغم من أن اندلاع الحرب العالمية الأولى في عام 1914 أنهى ذلك الجو الجامعي الذي دام حتى ذلك الوقت، لأن مساعدي رذرفورد كلفوا بمشروعات بحوث مختلفة ليدعموا حرب الحكومة البريطانية مع ألمانيا. وقد ساهم رذرفورد نفسه بنصيبه في المجهود الحربي بمحاولته إيجاد وسائل لاكتشاف الغواصات، كما أمضى سنة عضواً في البعثة البريطانية إلى الولايات المتحدة[19].

وبعد الحرب، أكمل رذرفورد تجاربه الشهيرة على تفكك الآزوت الاصطناعي برجمه بجسيْمات ألفا، ثم لم يلبث أن غادر منشستر بعد ذلك ليصبح مديراً لمختبر كافنْدش في كمبردج وزميلاً في كلية ترينيتي(20). وفي عام 1920 ألقى رذرفورد محاضرة أخرى في الجمعية الملكية عرض فيها نظريته عن النشاط الإشعاعي «مقترحاً وجود جسيمات حيادية ذات كتلة واحدة» ـــ وهي التي دعاها مكتشفها ج. شادويك James Chadwick بعد ذلك نترونات(20) ـــ وقد اقترح رذرفورد في نهاية ذلك العام 1920 أن يطلق على نواة ذرة الهدروجين ـــ بسبب شحنتها الموجبة ـــ اسم «بروتون» وهو التعبير الذي ظل مستخدماً إلى اليوم(20).

كانت واجبات رذرفورد الإدارية تترصع من حين لآخر بالمحاضرات واحتفالات الجوائز، فقد مُنح الكثير من درجات الشرف وأوسمة الاستحقاق، وأصبح في عام 1925 رئيساً للجمعية الملكية ثم لُقِّب بارون رذرفورد أوف نلسون. وعلى الرغم من أنه كان يُسَرّ بالتكريم وبالاهتمام الذي كانت تغدقه عليه الصحافة الشعبية، فقد تابع بذل جهوده في الإشراف على العمل الجاري في مختبر كافنديش، محافظاً في الوقت نفسه على اطلاعه على أحدث المكتشفات في الفيزياء النووية بما فيها اكتشاف شادويك للنترون، واستخدام كوكرُفْت Cockroft و ولسون Wilson طريقة الرجم بالبروتونات لإحداث التفكك الإشعاعي الاصطناعي، واكتشاف أندرسون Anderson للبوزترون. وقد حدثت وفاته من اختناق الفتق وهو في السادسة والستين قبل أول نجاح تحقق في التفاعل النووي المتسلسل؛ ولكن من المرجح أن بحوثه التجريبية وفرت له بعض الإيحاءات عن القوة المدمرة التي يمكن أن تنطلق من الذرة(21).

أما المركبة الثالثة في أشعة النشاط الإشعاعي ـــ أي أشعة غاما ـــ فقد اكتشفها ب. فيلار Paul Villard عام 1900، وأثبت أنها أشعة نفاذة جداً ولا تنحرف في الحقل المغنطيسي، كما استنتج أيضاً، وهو محق في ذلك، أن هذه الأشعة هي أمواج كهرطيسية، وأنها، مثل الأشعة السينية نفسها كيفياً ولا تختلفان إلا بطول الموجة، فطول موجة الأشعة السينية هو من رتبة بضعة انغسترومات (الأنغستروم هو وحدة طول تساوي جزءاً من مئة مليون من السنتمتر 10^{-8} سم)، أما طول موجة أشعة غاما فهو أصغر من طول موجة الأشعة السينية بـ 100-1000 مرة.

لقد أدخل رذرفورد عدداً من المفاهيم المهمة في دراسة النشاط الإشعاعي كان أهمها على الأرجح هو مفهوم عمر نصف العنصر النشيط إشعاعياً؛ فقد عرّف عمر النصف بأنه الزمن اللازم لتفكك نصف كمية ما من العنصر المشع، أي اللازم لتحول هذا النصف إلى عنصر آخر نتيجة إصدار جسيمات ألفا أو بيتا. وقد قاس عمر نصف التوريوم (وهو أول عمر نصف يقاس) بأن راقب بكل عناية معدل تناقص شدة الإشعاع الصادر مع الزمن واستنتج من قياسه أن هذه الشدة تتناقص أسياً. وهذه دراسة مهمة، إذ يستفاد من عمر النصف للعناصر المشعة في التأريخ

الجيولوجي. فعلى سبيل المثال، إذا كان الرصاص المختلط باليورانيوم هو الناتج النهائي بعد سلسلة التفككات الإشعاعية التي بدأت باليورانيوم نفسه، فإن معرفة نسبة اليورانيوم المتبقي في غرام واحد من هذا الخليط بالإضافة إلى معرفة عمر نصف اليورانيوم تعطينا عمر الأرض. وهذا يقودنا إلى اكتشافٍ مهم آخر تتضمنه نظرية رذرفورد وسودي الشهيرة عن تحول العناصر المشعة.

ففي تلك الأيام الأولى التي لم يعرف أحد فيها مصدر أشعة ألفا وبيتا وغاما كان النشاط الإشعاعي أشد الظواهر التي تواجه الفيزيائيين غموضاً وباعثاً على الحيرة، وذلك لما تبديه من خرق واضح لمبدأ انحفاظ الطاقة، إذ كان يبدو كأن العنصر المشع، مثل اليورانيوم، يصدر الطاقة باستمرار من دون أي تبدل كيمياوي ظاهر أو تأثر بعوامل خارجية، فلا عجب أن يرى فيه فيزيائيو السنوات الأولى من هذا القرن، نوعاً من المعجزة التي تتحدى قوانين الفيزياء الأساسية. وكانت ماري كوري تصفه بأنه «على تناقض ــ أو هكذا يبدو ــ مع مبدأ كارنو» (القانون الثاني في الترموديناميكِ). وكان اللورد كلفن يُقر بأن اكتشاف بكرل قد وضع لأول مرة في تاريخ مبدأ انحفاظ الطاقة أول إشارة استفهام تجاه هذا المبدأ.

والحقيقة أن هذه الصعوبة في النشاط الإشعاعي كانت ترجع في الأصل إلى أن الفيزيائيين الأوائل كانوا يتصورون أن النشاط الإشعاعي يصدر عن مادة متصلة بدلاً من ذرات فردية في المادة، فكان مفهوم الذرة عندهم مفهوماً غامضاً، حتى لقد كان بعض الفيزيائيين والكيميائيين البارزين يرفضونه رفضاً عنيفاً. ولكن حتى لو كان النشاط الإشعاعي آنذاك أمراً مسلماً به عامة فإن هذا لم يمنع من بقاء بعض المسائل الجدية عالقة به، لأن مفهوم الذرة يعني أنها لا تقبل الانقسام، وهذا خلاف النشاط الإشعاعي الذي يقتضي أن تكون الذرة المشعة قابلة للانقسام لأنها تصدر جسيماً، الأمر الذي يؤدي إلى تحول العناصر، وإلى عالمٍ هو دون عالم الذرة.

ولكن هذه الصعوبات زالت جميعها بنظرية رذرفورد وسودي في التحول وهي نظرية تنطلق من الفكرة التي كانت ثورية آنذاك وتقول إن بعض الذرات غير مستقرة وأنها تخضع تلقائياً للتحول فتطلق أشعة وتتحول تلقائياً إلى نوع آخر من الذرات. ولكن ذلك لم يمح صعوبة الطاقة أو يضع حداً نهائياً للجدل، لأن كمية الطاقة الصادرة على هيئة أشعة ألفا وبيتا وغاما تفيض كثيراً عما ينتج عن أي تفاعل كيمياوي. وقد وجد بيير كوري وزميل له في عام 1903 أن غراماً واحداً من الراديوم يمكن أن يرفع درجة حرارة 1,3 غرام من الماء من درجة الانصهار إلى درجة الغليان في مدة ساعة واحدة، وأنه يستطيع تقريباً الاستمرار في ذلك بلا نهاية. وقد طرحت هذه القياسات سؤالاً مهماً عن مصدر هذه الطاقة، ثم أصبح السؤال حرجاً عندما اكتُشف أن أحد المخلفات الناتجة عن اليورانيوم، وهو العنصر المشع الرادون، يطلق في وحدة الزمن طاقة تساوي مليون مرة من الطاقة التي تتحرر عندما يتحد الحجم نفسه من الأكسجين والهدروجين لتكوين الماء باتحاد كيمياوي

انفجاري . ولقد حاول معظم الفيزيائيين في ذلك الزمانْ أن يفسروا هذه الطاقة الإشعاعية الهائلة بأنها نابعة من مصدر خارجي ، وأن الذرة تخزنها في داخلها إلى أن تصبح نشيطة إشعاعياً فتعيد إطلاقها . وقد صمدت فرضية المصدر الخارجي هذه لبعض الوقت ولم تتلاشَ كلياً إلا عندما أصبحت البنية النووية مفهومة .

إن نظرية رذرفورد ــ سودي واضحة كل الوضوح وتعطي صورة كاملة عن تحول النوى الثقيلة إلى نوى خفيفة ناتجة عن الذرات الفردية في مختلف العناصر التي تمر بها تباعاً بسيرورة خطوة فخطوة ، ويتوقف الناتج النهائي على الأشعة المنطلقة في أثناء السيرورة : هل هي أشعة ألفا أم بيتا أم غاما . فإذا كانت أشعة ألفا (أي نوى هليوم) هي المنطلقة ، كما في تفكك ذرة اليورانيوم ، فإن الوزن الذري للذرة الناتجة يكون أقل بأربع وحدات من الوزن الذري للذرة الأصلية ، ويكون عددها الذري أقل بدرجتين . وعلى هذا ، إذا كان A' هو الوزن الذري الجديد وN' هو العدد الذري الجديد فعندئذ يكون : $A' = A-4$ و$N' = N-2$ ، حيث A الوزن الذري وN العدد الذري للذرة الأصلية ؛ أما إذا انطلق جسيم بيتا فلا يتغير الوزن الذري وإنما يزداد العدد الذري درجة واحدة ، أي $A' = A$ و$N' = N + 1$ ؛ وإذا انطلقت أشعة غاما (وهي فوتونات عالية التواتر جداً) فعندئذ لا يتغير أي من الوزن الذري أو العدد الذري ، وفي هذه الحالة ، من الواضح أنه لا تتبدل طبيعة الذرة ، بل تنتقل من وضع طاقةٍ معيّن إلى وضع طاقة أدنى ، والفرق في الطاقة هو طاقة الفوتون المنطلق .

ولا بد أن يكون مفهوماً بوضوح أن عمليات إصدار أشعة ألفا وبيتا وغاما لا يرتبط أحدها بالآخر بأية طريقة ، وأن الذرة المشعة من نوع معيّن لا تطلق سوى نوعٍ واحد من الجسيمات ، أي أن الذرة المشعة إما أن تطلق جسيم ألفا ، أو جسيم بيتا أو أشعة غاما ولا تغيّر إشعاعها أبداً ، كما لا يمكن أن نعرف أبداً ، فيما يتصل بتجمع الذرات المشعة ، ما هي الذرة التي ستتفكك وفي غضون أي مدة (مهما طالت) ، وكل ما نستطيع التنبؤ به هو عدد الذرات الكلي التي ستتفكك ؛ فمعدل حدوث ذلك هو الذي يعيّن عمر نصف العنصر ، وكلما كان عمر نصف العنصر المشع أطول كان نشاطه الإشعاعي أضعف بوجه عام .

لقد بسط إذاً عمل رذرفورد وسودي قدراً كبيراً من النظام في فيزياء النشاط الإشعاعي ، ولكن الأسئلة الأساسية : لماذا تصبح الذرات نشيطة إشعاعياً ؟ وكيف ؟ وما الذي يحدِّد عمر النشاط الإشعاعي ؟ لم تجد الإجابة عنها حتى اكتُشفت النوى وتطورت النظرية النووية . كما تطلبت نظرية إصدار جسيمات ألفا ، فضلاً عن ذلك ، تطور ميكانيك الكم ؛ ولكن ، قبل الدخول في هذه الدراسة ، علينا أن نلقي نظرة على مساهمات أينشتاين في تطور الفيزياء الحديثة التي تأثرت بها تأثيراً عميقاً في كل طور من أطوارها .

ألبرت أينشتاين ونظرية النسبية

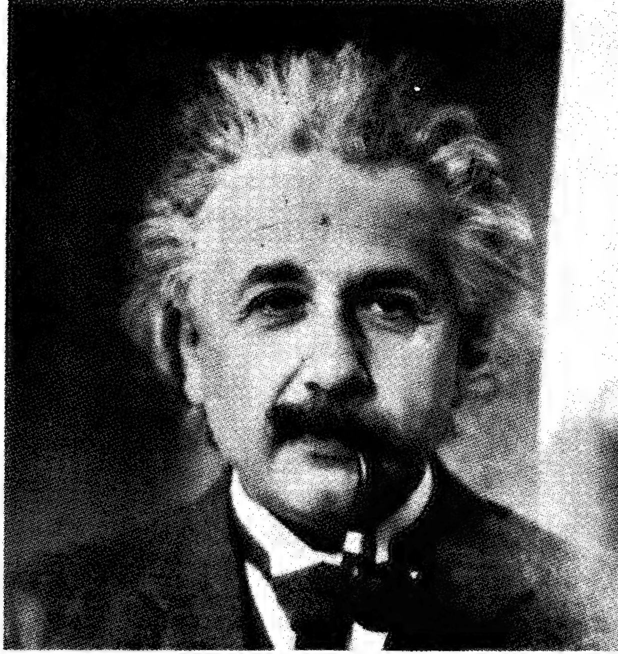
«إذا بدأ الإنسان باليقين فإنه ينتهي قطعاً بالشك، أما إذا اكتفى بأن يبدأ بالشك فإنه ينتهي قطعاً باليقين».

ـ فرنسيس بيكون*

وُلد ألبرت أينشتاين (1879-1955) في مدينة أُلْم في ألمانيا، وكان والداه هِرْمان وبولين أينشتاين (بولين كوخ Koch سابقاً) مثل آل أينشتاين وكثير من اليهود، المتحدرين من أسلاف فلاحين، لا يبالغون في تدينهم، فنادراً ما كانوا يؤمون الكنيس المحلي. وكان ذوَوه ميسوري الحال، وكان والده الذي يدير معملاً كهربائياً صغيراً في أُلْم، بتمويلٍ من أحد أقارب بولين، شاباً مرحاً يفضل أن يصطحب أسرته في نزهة ريفية على أن ينصرف إلى المزيد من أمور الدنيا في إدارة العمل، وكان إخفاقه في عمله قبل أن يُكمل ألبرت أول سنة من عمره سبباً في أن يرحل هرمان مع أسرته إلى مونيخ حيث كوّن مع أخيه جاكوب شراكة أكثر نجاحاً، بأن أدار صناعة صغيرة للكهركيمياويات. وبعد سنة من وصولهم وُلدت مايا Maja أخت ألبرت التي أصبحت أقرب خلصائه، فكان واضحاً أن وفاتها، عندما بلغ أينشتاين السبعين من عمره، قد آلمته أكثر مما آلمته وفاة كل من والديه أو زوجتيه[1].

ومع أن مونيخ كانت مدينة كاثوليكية بنسبة ساحقة، فإن أسرة أينشتاين لم تلق سوى القليل من أوجه العداء التي أصبحت ملحوظة في بافارية عند ظهور النازية بعد 40 سنة من ذلك. ويمكن أن نلخص حياة هذه الأسرة بأنه تحدٍ غير يهودي للعُرف، فنادراً ما راعوا شعائر يوم السبت، كما لم يتبعوا توجيهات عقيدتهم في المحرّمات، وكان هرمان يرى أن معظم عادات عقيدته مجرد خرافات، فانتقل موقفه هذا تجاه السلطة الدينية إلى ولده الذي كان يبدي استخفافاً مشاكساً تجاه أعراف المجتمع سواء في لباسه أم في آرائه عن الدين أو السياسة بل حتى الفيزياء.

* Francis Bacon (1561-1626) فيلسوف وأديب إنكليزي ورجل دولة، من المنادين الأوائل بالعلم التجريبي.



ألبرت أينشتاين (1879-1955)

كان أينشتاين مثل إسحق نيوتن طفلاً غير سابق لأوانه، فكان بطيئاً في تعلم الكلام، ولم تجر الألمانية على لسانه بسهولة، إلا حين أصبح في العاشرة، وخشي والداه أن يكون بليداً أو متخلفاً، ولكن يبدو على الأرجح أنه كان يميل إلى أحلام اليقظة التي كانت تختطفه من هذا العالم[2]؛ فلم يُبد كبير اهتمام بدروسه في المدرسة الكاثوليكية التي كان يواظب عليها منذ كان في الخامسة حتى بلغ العاشرة، لذلك لم يولِ أساتذتُه اهتماماً كبيراً بقدراته أو بإمكانات تقدمه، حتى لقد قدم أحد معلميه تقريراً لوالده بأنه لا أهمية للمجال الذي يختاره لابنه لأنه لن يفلح في أي مجال أبداً[2]. وفي عام 1889 انتقل ألبرت إلى ثانوية لويتبولد Luitpold، وهي مدرسة ألمانية نموذجية حيث كان يُعنى المعلمون بالمحافظة على انضباط الطلاب مثلما يُعنون بتعليمهم دروسهم؛ فغرس هذا الجو القسري القاسي في نفس ألبرت مزية الارتياب بالسلطة ولا سيما بالسلطة التعليمية. وقد لا تكون ثانوية لويتبولد أحسن أو أسوأ من غيرها من ثانويات ألمانيا، إلا أن معلميها، الذين كان كثير منهم، كما أكد ألبرت بعد ذلك، غير صالح لعمله، كان لديهم نزعة لاستخدام العنف أو القسر لإرغام الطلاب العنيدين أو الثرثارين على الانضباط، مما أثبت لألبرت أن على المرء أن يكون شكاكاً دائماً بالأعراف؛ وهذا الشك هو ما كان بلا جدال ماثلاً بوضوح في الطريقة التي كان ينظر بها إلى بناء

الفيزياء التقليدية العقلي في نهاية القرن التاسع عشر عندما كان الكثير من الفيزيائيين يحثون تلاميذهم على التوجه نحو مجالات أخرى بحجة أن ما بقي بحاجة للعمل في مجال الفيزياء قليل. ومهما يكن من أمر فقد طرأ لألبرت، وهو ما يزال طالباً في الثانوية حادث ترك أثراً عميقاً لديه ووجهه نحو الموضوع الذي سيمتلك يوماً ما ناصيته؛ إذ عثر، وهو في الثانية عشر على كتاب في الرياضيات تعلم منه الهندسة وحده قبل أن تدرَّس له في المدرسة «فترك اتساق النظريات ومنطقها أثراً لم يُمحَ أبداً لدى أينشتاين»[3].

وفي عام 1894، وبعد أن أخفق والده هرمان في عمله، انتقل والداه وأخته إلى ميلانو في إيطاليا؛ ولما لم يكن ألبرت قد استوفى بعد شروط شهادته التي كانت ضرورية لقبوله في الجامعة، فقد تخلف عن أسرته وبقي في رعاية بعض الأقرباء. ولما لم يكن سعيداً في المدرسة والمنزل، بدأ اهتمامه بدروسه يضعف شيئاً فشيئاً، وتفاقمت لا مبالاته تجاه عمله إلى أن طلب منه أخيراً أحد الأساتذة أن يترك الثانوية، فقبل ألبرت نصيحته بكل سرور ورحل إلى ميلانو للانضمام إلى أسرته. وقد بدأ يفكر جدياً، بسبب وضع أسرته المالي القلق، في نوع المهنة التي عليه أن يمارسها ولا سيما أن افتقاره للشهادة الثانوية حرمه من الانتساب إلى أي جامعة في إيطاليا، ولكن سرعان ما علم أن معهد البوليتكنيك (المتعدد التقانات) في زوريخ في سويسرا لا يتطلب شهادة ثانوية للانتساب إليه وأن ما على الطالب المرشح إلا أن يجتاز فحص القبول.

وهكذا سافر أينشتاين إلى سويسرا وتقدم للامتحان ولكنه لم ينجح، وكان إخفاقه ناجماً عن عدم تحضيره المناسب أكثر مما كان ناجماً عن افتقاره للمعرفة في العلوم والرياضيات الأساسية، لذلك انتسب إلى المدرسة الثانوية في آرو Aarau وأجهد نفسه في دراسة الموضوعات الضعيفة لديه مثل علم الحياة (البيولوجية) واللغات. وقد وجد أينشتاين أن سنته في آرو كانت سارة بخلاف سنواته في ثانوية لويتبولد، فمعظم المعلمين كانوا يظهرون اهتماماً أكبر في تعليم الطلاب أن يفكروا وحدهم بدلاً من أن يرهبوهم. ومهما يكن من أمر، فقد تقدم لامتحان القبول في عام 1896 ونجح فيه نجاحاً حسناً هيأه لمتابعة منهاج أربع سنوات دراسية يمنح بعدها صفة المعلم؛ وقد أتى قبوله في معهد البوليتكنيك السويسري في أواسط عام 1896 بعد ستة أشهر من تخليه رسمياً عن جنسيته الألمانية. وكان السبب في اتخاذه هذا القرار هو أنه كان يربط دائماً بين السلطة العسكرية والسلطة البروسية، ولأن أفكاره عن الألمان كانت سيئة بوجهٍ عام. وظل أينشتاين بلا جنسية لأنه لم يكن قد طلب بعد الجنسية السويسرية.

ولم تكن سنوات دراسته في المعهد تلك السنوات الخارقة، فقد استمر في مناقشات طويلة مع أصدقائه في موضوعات تتدرج من السياسة والدين إلى العلم والرياضيات. وكان لا يهتم كثيراً بملبسه، ويعزف على كمانه من حين لآخر في حفلات موسيقية فردية، وكان يقوم بنزهات طويلة سيراً

على الأقدام في الريف ، وتعلّم قيادة المركب الشراعي . وقد وجد بعد جو دراسته الأكاديمية الكئيب في ألمانيا حياة راقية ولطيفة في المعهد ، على أن موقفه الواهن (غير الناشط) تجاه قاعات الدرس لم يتغير ، فنادراً ما كان يحضر المحاضرات ، وكان يقرأ كتبه في غرفته ويستعير الأمالي من زملائه في الصف لكي ينجح في امتحاناته ؛ ومع ذلك فقد وجد أينشتاين أن الشروط الأكاديمية تتطلب منه ، لكي يحقق رغبته في أن يصبح فيزيائياً رياضياً ، أن يتلقى أساساً متيناً كاملاً في الرياضيات والعلوم . كما أقنعت مطالب المنهج أينشتاين بمزية نظام التعليم الذاتي ، فأجبر نفسه على أن يركز على امتلاك ناصية المبادئ الأساسية في كل موضوع حتى أنه استمر في اعتقاده بأن حضوره في الصف كان يعوق تعلمه .

لذلك ليس غريباً أن يكون عدم اهتمامه بقاعات الدرس سبباً في إخفاقه بالحصول على مركز مساعدٍ في المعهد بعد نيله الشهادة عام 1900 ، لأن عدم اهتمامه هذا لم يشجع أحداً من الأساتذة على قبوله ، فكانوا يشعرون أنه ربما يُظهر تهاوناً مماثلاً في عمله . وقد تدبر ، بعد أن خاب أمله ، عملاً في زوريخ مع أ . وُلْفر A.Wolfer ، مدير المرصد السويسري الفِدرالي حيث مكنه تعيينه من أن يفي بمتطلبات الحصول على الجنسية السويسرية .

وفي كانون الأول / ديسمبر من عام 1900 ، ظهر أول بحث منشور لأينشتاين في المجلة الفيزيائية Annalen der Physik ، وهو عمل استوحاه من أعمال الكيميائي و . أستفالد W.Ostwald الطليعية في مبادئ التحليل الكهربائي[4] . ومع أن هذه المقالة لم تُكسب أينشتاين منصباً في البحث العلمي ، فإنه استكمل كسب عيشه بالتعليم والدروس الخاصة ، وفي أثناء هذا العمل غير المضمون ، أكمل أطروحته في النظرية الحركية للغازات وأرسلها إلى جامعة زوريخ كي يفي بشروط الدكتوراه . وفي عام 1902 ، عثر أينشتاين أخيراً على وظيفة مستقرة هي وظيفة مدقق مبتدئ في مكتب براءات الاختراع السويسري حيث وجد في عزلة مركزه جواً مثالياً للتأمل في المكان والزمان وطبيعة العالَم الفيزيائي مع أنه كان يعمل ستة أيام في الأسبوع .

وهكذا كان أينشتاين طيلة السنوات الثلاث التالية يطوّر ، وهو في الغرفة الخلفية من شقته الصغيرة في برْن ، أفكاره الثورية عن المكان والزمان ، ثم تمكن بزواجه في عام 1903 من زميلة سابقة في الدراسة ، هي ميليفا ماريك Mileva Maric ، أن يتجنب استهلاك وقته يومياً في شؤون الطبخ والتنظيف ، وإن كان من المشكوك فيه أن أينشتاين قد اهتم يوماً بكيّ سرواله أو بتناول عشائه ساخناً . ومهما يكن من أمر ، فقد أمضى معظم وقته الحر يفكر في فيزياء نيوتن ، فطور بالتدريج هيكلاً نظرياً أقنعه بأن مفهوم نيوتن عن المكان المطلق والزمان المطلق هو مفهوم خاطىء . ومما يلفت النظر بوجه خاص في هذه السنوات الثلاث أن أينشتاين لم يتدارس فيها أفكاره مع أي فيزيائي مختص بل طورها بمفرده كلياً . وحين أرسل ثمرة بحوثه هذه في ثلاثة مقالات إلى المجلة Annalen der

Physik ، لم يكن قد حصل بعد على الدكتوراه ، لذلك خشي ، وهو الذي لا يحمل أي صفة علمية بارزة ، ألا يُنظر إلى مقالاته نظرة جدية ؛ ولكن طبيعة مقالاته الثورية انكشفت لحسن الحظ ، إذ رأى و . فين W.Wien ، رئيس تحرير المجلة ، أنها كانت عمل شاب في مقتبل العمر ــ 26 سنة ــ يمتلك بصيرة رائعة في الفيزياء ، فالبحوث كانت « قصيرة نسبياً ، ولكنها جميعاً تحوي الأسس اللازمة لنظريات جديدة ، حتى وإن لم يُتوسع فيها ــ فكأنها كما وصفها لوي دي بروي ، صواريخ متوهجة تنشر في ظلام الليل ضياءً ساطعاً ينير على الرغم من قصره مناطق شاسعة كانت مجهولة »[5] . ومع ذلك ، لم يقبل الجميع أفكار أينشتاين منذ البدء ، لأن عدداً من العلماء المحافظين ظلوا يعارضون ، كما هو منتظر ، نتائجها الثورية الكاسحة ، إلى أن أتى الفيزيائيون التجريبيون بالبرهان القاطع على صحة نظرياته . وكانت المقالة الأولى تعيد إحياء النظرية الجسيمية في الضوء بأن أدخلت فكرة الفوتون الطليق الثورية ــ أو ذرة الضوء ــ لكي تفسّر ظاهرة الإشعاع (عدا عن ظاهرة إشعاع الجسم الأسود) ، ولكي تفسر بوجه خاص المفعول الكهرضوئي . وقد تحقق روبرت ميليكان بتجاربه من أفكار أينشتاين في هذا المجال الأخير بين عامي 1912 و1915 . وكانت المقالة الثانية نظرية رياضية في الحركة البراوْنية التي أضافت دليلاً على حقيقة جزيئات الغاز استناداً إلى أن الجسيمات المعلقة في سائل يجب أن تسلك سلوك جسيمات ضخمة ؛ وهذا التوقع هو ما تحققه جان بيرّان بتجاربه البديعة عام 1909 . أما المقالة الثالثة والأخيرة فكانت أول ما نشره عن نظرية النسبية ، فهي تبحث في ذلك الفرع من النظرية الذي يدعى الآن النظرية الخاصة التي استخدمت كثيراً في الفيزياء الذرية »[6] .

وعلى الرغم من استقبال أعمال أينشتاين الاستقبال اللائق من بعض أبرز علماء أوربا المتميزين ، مثل ماكس بلانك الذي كان الرجلَ الوحيد الذي يجله أينشتاين فإن هذا الاستقبال لم يوصله إلى الشهرة بين عشية وضحاها . وكان السبب الأول في ذلك هو أن بحوثه ، معَ أنها كُتبت بوضوح وخلت من الحواشي الكثيرة التي تسود عادة معظم البحوث التي تنشر في المجلات العلمية ، كانت تطلب من العلماء ، الذين بنوا نجاحهم على تدعيم بعض جوانب الميكانيك النيوتني ونظرية مكسويل في الكهرمغنطيسية ، أن ينظروا إلى هذين الفرعين من الفيزياء ، اللذيْن كانا يعدان حتى ذلك الحين متمايزيْن وغير مترابطين أساساً ، على أنهما يمكن أن يكونا مرتبطين بطريقة ما بسرعة الضوء ــ أو بما يسمى « السرعة الكونية القصوى » . ففي حين يفترض ميكانيك نيوتن أنه يمكن للجسم أن يتحرك بأي سرعة كانت طالما استخدمت القوة اللازمة لتسريعه ، أتت نظرية أينشتاين فهدمت الفيزياء التقليدية واستنتجت أن لا شيء يتحرك بأسرع من الضوء . وقد أثبت أينشتاين ، بعكس نيوتن تماماً ، أن تحريك الجسم بسرعة الضوء يحتاج إلى إعطائه كمية لا نهائية من الطاقة ، وهذا أمر مستحيل ، لأن كمية الطاقة المتيسرة في الكون محدودة .

وفي حين كانت بحوث أينشتاين تنتشر ببطء في جامعات العالم ، استمر هو في عمله في

مكتب براءات الاختراع في سويسرا حتى عام 1909 . وكان حينذاك أمهر مدققي المكتب من الناحية التقنية ، كما اعترف مخدوموه بمكانته على صورة زيادات متلاحقة بالأجر . ولكنه كان ينظر دائماً إلى عمله في مكتب براءات الاختراع على أنه عمل مؤقت ، مع أنه أتاح له الوقت الذي يحتاجه لصياغة نظرياته الأساسية ، لذلك لم يكن يفكر بشيء آخر غير مغادرة مركزه هذا حين قبل منصب أستاذ مساعد في الفيزياء في جامعة زوريخ عام 1909 .

على أن دخوله الرسمي في المجتمع الأكاديمي لم يغير كثيراً من أسلوب حياته ، لأن راتبه في زوريخ لم يختلف عن راتبه في مكتب براءات الاختراع ؛ ومع أنه كان يكسب بعض المال الإضافي من المحاضرات التي راح يلقيها ، فقد امتص ارتفاع تكاليف المعيشة في زوريخ معظم ما يكسبه . وهكذا كان أينشتاين غير راضٍ أبداً عن وضعه ، لذلك سرعان ما قبل العروض غير الرسمية التي قدمها له ممثلو الكثير من المعاهد ، ولا سيما الجامعة الألمانية في براغ . وكان العامل الأهم في قراره بالانتقال إلى براغ عام 1910 لمدة عامين هو الوعد بمنصب أستاذ أصيل ومزيد من المال ومصاريف أقل ، ولكن أكثر ما أغراه هو التسهيلات ولا سيما المكتبة الموجودة في براغ .

وحين وصل براغ ، بدأ يكوّن أفكاره التي أصبحت أساس نظرية النسبية العامة ، أي انحناء الزمان والمكان بالكتلة والطاقة ، وسرعان ما اكتشف أن واجباته الجامعية الرسمية ، ولا سيما العمل التجريبي الرتيب ومحاضرات الطلاب ، تستغرق من وقته أكثر مما كان يود ، فتلاشى في أشهر قليلة حماسه الأول للانتقال إلى براغ . وفي عام 1912 غادر الجامعة الألمانية وعاد إلى زوريخ ، ولكنه لم يبق فيها إلا سنة واحدة قبل أن يقبل منصب مدير معهد القيصر ولْهلم في برلين .

ولم يكن أينشتاين ليعبأ أبداً بألمانيا أو شعبها كما تبين لنا من فقدانه للجنسية الألمانية وهو بعد مراهق ، غير أن الْتماسات بلانك و نِرنست Nernst الشخصية ، وكانا آنذاك من ألمع فيزيائيي ذلك العصر ، هي التي غيّرت رأيه لكي ينضم إليهم في برلين . ولم يكن أينشتاين قد وُعد فحسب بإدارة معهد القيصر ، بل عُرض عليه منصب أستاذ شرف في جامعة برلين ، وهو منصب يحرّره من واجبات المحاضرات وجلسات المختبر ، فيتاح له أن ينصرف كلياً لبحوثه . وكان انتقاله إلى برلين يعني أيضاً مضاعفة راتبه الذي كان يتلقاه في زوريخ ، لذلك وجد أن العرض لا يقاوَم ، فانتقلت الأسرة إلى برلين في نيسان / أبريل عام 1914 ، حين كانت السحب تنذر بالحرب ، ولكن ميليفا لم تستطع العيش في برلين ، فهجرت أينشتاين وعادت إلى سويسرا مصطحبة ولديْهما .

وقد كان زواجهما أساساً في وضع مضطرب لبعض الوقت ، إلا أن أينشتاين كان يفضل عمله دائماً على أسرته ، فلم يسبب له إنهاء زواجه كثيراً من الحزن ، ولا سيما أنه كان منهمكاً في بذل جهد كبير لتصحيح الأخطاء الرياضية في نظريته النسبية العامة . ثم اندلعت الحرب العظمى فتغيرت الأوضاع الجامعية تغيراً جوهرياً ، لأن كثيراً من زملائه بدأوا يبذلون جهودهم كلها في

البحوث الحكومية التي تعزز المجهود الحربي ، ولكن أينشتاين تجنب الانخراط في هذا العمل ، وكان يرى أن اجتياح ألمانيا لروسيا وفرنسا حماقة لن تجلب معها سوى الألم الشديد لسائر الدول الأوربية مع ما فيها من قلة اكتراث بإراقة الدماء ؛ كما زاد من اشمئزاز أينشتاين اكتساحُ الألمان للأراضي البلجيكية المحايدة لأنه رأى فيه النزعة العسكرية الخاصة بألمانيا ، مع أن معظم راتبه كان يُدفع من المنح التي تقدمها أساساً الصناعات الألمانية . وكان أينشتاين يعتقد أن البديل الوحيد لهذا الحريق الهائل ، الذي يدمّر جيلاً بأكمله من الشبان ، هو حكومة أوربية موحدة ، ولكن أحداً لم يعبأ بوجهة نظره . وكان يعد نفسه داعية سلام ، ولكن آراءه عن الحرب وعن الدفاع عن النفس كانت ساذجة إلى حدٍ ما ، إذ لم يتغير اعتقاده بأنه لا وجود لحرب مبرَّرة إلا حين خلص في الثلاثينيات إلى أنه لا غنى عن حرب تنقذ العالم من أدولف هتلر . ومهما يكن من أمر فقد حمته جنسيته السويسرية من كثير من المضايقات الرسمية بسبب سلوكه اللا وطني ، كما مكّنته من الرحيل إلى سويسرا في عدة مناسبات في أثناء الحرب .

وفي عام 1916 لخص أينشتاين في بحث ظهر في المجلة الفيزيائية Annalen der Physik نظريته النسبية العامة ، فبيَّن في أقل من 60 صفحة أن الفضاء ليس مجرد ستارة تتجلى عليها الحوادث ، بل هو نفسه بنية أساسية تتأثر بطاقة الأجسام التي يحويها وبكتلها . وقد عَلّق ماكس بورْن Max Born على النظرية بقوله « تبدو لي النظرية أنها أعظم إنجاز حققه الفكر البشري عن الطبيعة ، وأنها أعظم تركيب مذهل يجمع بين النظرة الفلسفية الثاقبة والإلهام الفيزيائي والمهارة الرياضية . ولكن ارتباطها بالتجربة كان هزيلاً لدرجة أنها تعجبني كما يعجبني أي عمل فني عظيم ، أتمتع به وأتأمله بإعجاب ولكن عن بعد »[7] . وكانت مقالة أينشتاين تتضمن هندسة جورج ريمان القائلة بالانحناء الموجب والتي طرحت جانباً مستويات إقليدس المسطحة وخطوطه المستقيمة ، فأصبح بالإمكان إعطاء وصف رياضي لانحناء المكان بالطاقة والمادة ولانعطاف أشعة الضوء بالثقالة .

وقد تطلبت نظرية النسبية العامة من أينشتاين تركيزاً شديداً استغرق أشهراً من الحسابات المعقدة المضنية ، حتى أنه أهمل صحته البدنية إهمالاً كاملاً ، فعانى في عام 1917 من انهيار عصبي بعد أن كان قد نشر بحثين آخرين لهما شأنهما ، عالج في أولهما إصدار الضوء المحفوز ، فكان الأساس النظري الذي انبثقت عنه تقنيات الليزر ، وعالج في البحث الثاني بنية الكون التي وضعت أساس موضوع علم الكونيات (الكوسمولوجية) الحديث . ثم ما لبث أينشتاين أن استعاد صحته ببطء بمساعدة ابنة عمه الثانية إلْزا التي تزوجها عام 1919 .

وكان أينشتاين قد عُرف آنذاك بأنه أحد الفيزيائيين الكبار في القرن العشرين ، هذا إن لم يكن أعظمهم ، ولكن شهرته لم تكن قد تجاوزت الدوائر العلمية ؛ ثم تغير هذا الوضع تغيراً سريعاً في عام 1919 عندما سافرت بعثة بريطانية بقيادة السير آرثر إدنغتون إلى جزيرة برنسيب Principe في

خليج غينية حيث التقطت صوراً فوتوغرافية لكسوف الشمس، أظهر تحليلها بعد ستة أشهر أن مسار الضوء الوارد من نجم بعيد قد انعطف فعلاً عند مروره بالقرب من قرص الشمس في أثناء الكسوف بتأثير حقل الشمس الثقالي، فأكد بذلك نظرية أينشتاين.

وقد أدت إعادة تنظيم بنية المكان والزمان، التي كانت قد استكملت بتثبيت نظرية أينشتاين العامة، إلى سيلٍ من المقالات والكتب عن نظرية النسبية وواضعها، وكانت تنبؤات نظريته النسبية تثير اهتمام الجماهير بما يبديه معظمها من تعارض مع الحس الفطري العام، كما أن شخصيته المتميزة وظهوره بمظهر «الرجل العادي» كانت مواضيع جذابة، فراحت تَرِده، مع هذا الاهتمام العالمي الواسع، آلاف الدعوات لكي يحاضر أو يكتب؛ إلا أن أينشتاين كان يهمل معظمها لما قد تحتاجه من وقت كبير على حساب عمله، ومع ذلك فقد شارك في نشاط الحركة الصهيونية التي كانت تسعى لإقامة وطن يهودي في فلسطين كما وضع شهرته في خدمة جهودهم لجمع الأموال اللازمة. ثم منح في عام 1922 جائزة نوبل في الفيزياء «لإسهامه في الفيزياء الرياضية ولا سيما لاكتشافه قانون المفعول الكهرضوئي». ولكن قرار الجائزة لم يأت على ذكر النسبية، لأن ألفرد نوبل (الذي أوصى بالجائزة) اشترط في وصيته أن تعطى المنح للاكتشافات التي تستفيد منها البشرية، فكان من الصعب على لجنة نوبل أن تتفق على الطريقة التي يمكن أن تحسِّن بها نظرية النسبية ظروف الإنسان.

التقى أينشتاين نيلزبور لأول مرة في عام 1920، وفي حين كان كلٌّ من الرجلين معجباً بالآخر منذ البدء إعجاباً عظيماً، فقد كانا خصمين فكريين لا يلينان، واستمر الجدل بينهما طيلة العقود الثلاثة التالية بشأن مضمون نظرية الكم، فكان كلٌّ منهما مقتنعاً بأن صاحبه على ضلال، «ذلك لأن أينشتاين كان أول من أتى منذ خمسة عشر عاماً بنفحة تقدير غير متوقعة للفكرة القائلة أنه يمكن أن يتألف الضوء، وبصورة معقولة، من أمواج وجسيمات معاً، ودعَم الفكرة القائلة أنه يمكن تطبيق نظرية بلانك الكمومية على المادة نفسها مثلما سبق أن طُبقت على الإشعاع. أما بور فهو الذي أتى بالتأييد العلمي لأولى هاتين الفكرتين بمبدأ التتامية **Complementarity**، وجعل للفكرة الثانية أساساً معقولاً بتفسيره نموذج ذرة رذرفورد النووي. ومع ذلك، لم تولِّد هذه الأفكار العظيمة وحدة بين الرجلين، بل ولدت خلافاً كبيراً بينهما»[8]. ومع أن معظم الفيزيائيين أقروا لبور أخيراً بالنصر وقبلوا حجته بأن السببية ليست ضرورية في فيزياء الكم، فإن اعتقاد أينشتاين بالحتمية، كما يتضح من ملاحظته التي يستشهد بها كثيراً وهي «أن الله لا يلعب بالنرد»، قاده إلى مواصلة الجدل حتى آخر حياته في مواجهة الإحصاء الاحتمالي الذي يؤيده بور: ولقد كانت آراء أينشتاين الفلسفية عن فيزياء الكم، التي سعى كثيراً إلى تكوينها وتنميتها سبباً في تخلفه في السنوات الأخيرة من حياته عن ركب المجتمع الفيزيائي وعجّلت بانسحابه من سواد المؤيدين للفيزياء الحديثة.

وقد ظل أينشتاين في برلين حتى وصول أدولف هتلر إلى السلطة في عام 1933 ، ومع أنه كان يلقى إعجاباً كبيراً من بعض قطاعات الشعب التي كانت ترى فيه رمزاً « للألماني الجديد » وللبراعة العلمية الألمانية الفائقة ، فإن فئات أخرى كالفاشيين كانت تحط من شأنه وتنتقد دعوته للسلام وميراثه الثقافي . وقد أصبح عرضة للتهديد بالموت وللعديد من اللقاءات التي كانت تتم أمام الجمهور ويناقش فيها « علماء متميزون » العيوب الأساسية في نظرية النسبية . ولكن أينشتاين كان يجد مظاهر العداوة لليهود مثيرة للشفقة أكثر مما هي منذرة ، ولكنه كان يخشى أن تزيد الفتنةُ شعورَ الخوف عند اليهود في ألمانيا . وقد رأى جدّياً ، مع ذلك وفي أكثر من مناسبة ، أن يغادر ألمانيا إلى الأبد لولا أن أقنعه بلانك بالبقاء ، لأن رحيله يمكن أن يكون خسارة فادحة لجامعة برلين وللشعب الألماني نفسه الذي كان لا يزال يحاول انتزاع نفسه من كارثة الحرب العظمى . ولقد صرف النظر مراراً عن عروض مغرية قدمتها له جامعات أوربية أخرى على الرغم من كراهيته لألمانيا ، إذ إنه كان يرى أن الواجب يملي عليه البقاء في عمله في الوقت الذي تحاول فيه حكومة فيمار Veimar المزعزعة تثبيت نفسها . والأهم من ذلك كونه يعرف أنه كان ، في ذلك الحين ، في أهم مركز علمي في العالم ، وأن رحيله يمكن أن يعقد جهوده التي كان قد بدأها في عام 1920 لوضع هيكل رياضي يمكن أن يوحّد الكهرطيسية والثقالة فيما يدعى « نظرية الحقل الموحّد » .

وكان انهيار الاقتصاد العالمي في عام 1929 وصعود النازية بعد ذلك إلى السلطة يعني نهاية مهمة أينشتاين في برلين ، كما كان مؤشِّراً على تحول وجهة نظره السياسية من رفض مطلق للعنف إلى دعم شروط الحرب الدفاعية ، وكان أينشتاين يرى أن هتلر تهديد للسلم في أوربة ، كما تأكد أنه إذا ما كانت أقوال هتلر المعادية لليهود تدل فعلاً على نواياه ، فإن رأس أينشتاين سيكون حتماً بين الرؤوس الأولى التي تقدم على الطبق . وقد قوّى حقدُ الفاشية من دعمه للحركة الصهيونية ، مع أنه كان يرتاب ببعض قادتها الراديكاليين ، كما شجع على البدء بالتفكير في المكان الذي يجب أن يرحل إليه إذا ما تسلم هتلر السلطة .

ولم يكن على أينشتاين أن ينتظر طويلاً للاهتداء إلى جواب عن هذا ، ففي بداية الثلاثينيات كان أستاذاً زائراً في معهد كاليفورنيا التكنولوجي في باسادينا لمدة عامين دراسيين ، ثم كانت زيارته الثالثة لباسادينا في عام 1933 ، قبل تعيين هتلر مستشاراً لألمانيا ، وقد اقترنت بقرار أينشتاين أنه لن يعود أبداً إلى ألمانيا ؛ وقام بجولة دعاية موفقة في أمريكا لم تخل من بعض المعارضة بسبب تعاطفه مع الجناح اليساري ، ثم سافر إلى بلجيكا حيث أعطى جواز سفره الألماني لممثل السفارة الألمانية في بروكسل ، واستقر في أورستد ، بينما كان ينظر في العروض التي قدمتها له جامعات عديدة منها كاليفورنيا وأكسفورد ومعهد الدراسات المتقدمة في برنستون الذي التحق به في نهاية عام 1933 ، وفيما عدا بعض الجولات العرضية في الولايات المتحدة ، فإنه بقي في برنستون إلى أن توفي في عام 1955 .

ولقد أمضى أينشتاين سنواته الأخيرة في مسيرته العلمية في بحثٍ لا طائل منه عن معادلات الحقل الموحد، ولكنه لم يأسف على الوقت الذي أنفقه عليه لأنه كان راضياً عن الشهرة التي شيدها لنفسه، فلم يكن لديه ما يفقده حتى لو ذهبت جهوده كلها أدراج الرياح. وكان يعرف ما في نفوس زملائه من الريبة في إمكان إيجاد مجموعة واحدة من المعادلات تفسر كل سيرورات الكون، ومع ذلك فقد كان يعتقد أنه الوحيد الذي يستطيع إنجاز مثل هذا العمل الفكري الشامخ، فظل يتابع هذا الهدف بتصميم عقلي فريد لمدة 30 عاماً على الرغم من وفاة زوجته الثانية إلزا في عام 1936، وعلى الرغم من تنامي ظنونه في أن بصيرته الثاقبة في الفيزياء كانت آخذة بالاضمحلال.

وربما كان أهم أعمال أينشتاين في أثناء إقامته في برنستون هو الرسالة الشهيرة التي أرسلها إلى الرئيس فرنكلين روزفلت في ربيع عام 1940 يحذّره فيها من أن النازيين يمكن أن يصنعوا قنبلة انشطارية ويستحث حكومة الولايات المتحدة على تنسيق جهود البحث، ولكن بحوث الانشطار كانت قائمة في عددٍ من الجامعات الأمريكية حتى قبل أن يهتم بها أينشتاين، ومع ذلك فقد ساعدت رسالته على إثارة اهتمام الحكومة بالبحث النووي. وقد عمل أينشتاين أيضاً مستشاراً لمكتب بحرية الولايات المتحدة للمعدات الحربية منذ عام 1943 حتى عام 1946.

وبعد الحرب، وزع أينشتاين وقته بين عمله الخاص وجهوده للحديث أمام الملأ من محاذير الحرب النووية، وكان يرى بحق أن مساهمة أمريكا في جهود دولية لمراقبة انتشار الأسلحة النووية وتطويرها في مرحلة ما بعد الحرب، هو مطلب أساسي للحفاظ على نوع من السلام الشامل، كما استمر في الدعاية لصالح الحركة الصهيونية وعُرض عليه أن يخلف حاييم وايزمان بعد موته 1952 في رئاسة دولة إسرائيل وهو منصب شرفي رسمي ليس إلا، وقد رأى في ذلك تكريماً كبيراً له، ولكنه رفض العرض قائلاً بأنه أصبح في سن لا تسمح له بالانتقال إلى إسرائيل، وكانت صحته تزداد سوءاً وتحد من نشاطه. في حين ظل على ثقته بنفسه حتى النهاية، كما وجد أن معدته تتشنج والغثيان يلازمه منذراً بانقضاء أجله. وكان آخر أعماله الهامة هو توقيعه قبل وفاته بعدة أيام على بيانٍ كان داعيته الأساسي برتراند رسّل، ويلخّص هذا البيان أخطار الحرب النووية ويحث الأمم كلها على حل خلافاتها بالطريقة السلمية.

طبيعة نظرية النسبية الثورية

لم يترك حادث بمفرده أثراً عميقاً في تفكير الإنسان مثلما ترك إعلان نظرية النسبية الذي جاء على مرحلتين فكريتين ضخمتين تمثلتا في النظرية الخاصة عام 1905 والنظرية العامة عام 1915. وقد يرى بعضهم في قولنا هذا جرأة أو شيئاً من التطرف، لأنهم قد يشيرون إلى نظرية داروِن في التطور أو نظرية بلانك الكمومية بأنهما قد أحدثتا في تفكيرنا أثراً أعظم مما تركته نظرية النسبية،

وهما، ولا شك، قامتا بدور مهم جداً في فهمنا للعالَم، ولكن نظرية النسبية تبدو، عند الموازنة، أهم إنتاج علمي لأنها أثّرت في كل طور من أطوار التفكير الفلسفي والعلمي.

ولقد أدت نظرية النسبية إلى دمج ثلاثة أبعاد مكانية مع بعد زماني في فضاء رباعي الأبعاد ومتعدد الجوانب، فأحدث ذلك تبدلاً عظيماً في الفلسفة، ولذلك تختلف الفلسفة الحديثة نتيجة لنظرية النسبية عن فلسفة كنط اختلاف الفيزياء الحديثة عن فيزياء نيوتن التقليدية. أما ما يتصل بالفيزياء نفسها، فإن نظرية النسبية تحتل مكانة تسمو بها على سائر النظريات الأخرى، فهي أشبه ما تكون بالنظرية الأساسية التي يجب أن تقاس عليها سائر النظريات الأخرى، ولا بد لكي تكون النظرية الفيزيائية مقبولة من أن تكون «صامدة نسبوياً»، أي يجب أن تكون ملائمة لبعض الشروط التي تفرضها نظرية النسبية، ويسري ذلك على نظرية الكم مثلما يسري على كل النظريات الأخرى حتى أن نظرية الكم هي، بمعنى ما «مساعد خاضع» لنظرية النسبية، ولكن العلاقة بين النظريتين تمضي في الحقيقة إلى ما هو أعمق من ذلك، لأن أسس نظرية الكم النظرية تدل على أنه بالإمكان استنتاجها من نظرية النسبية.

وإذا صرفنا النظر عن هذه الاعتبارات، فإننا نلاحظ أن معظم الناس يرون أن جوهر الفيزياء الحديثة متضمنٌ في نظرية النسبية، وأن هذه النظرية، في الوقت نفسه، هي أيضاً السر العلمي الكبير الذي يجب أن يسلموا به من دون أي سؤال، بل إن كلمة «نسبية» نفسها تحمل شيئاً من هذا الغموض، إذ ليس فيها ما يدل أدنى دلالة على صلب موضوعها أو أي إشارة مثلاً إلى علاقتها بنظرية عن الطبيعة، فمعظم الناس يفكرون فعلاً بالنسبية من وجهة نظرٍ عامةٍ هي أن المظاهر وأحجام الأجسام الظاهرية تتغير مع تغير وضع الراصد بالنسبة إلى هذه الأشياء، وهذه التغيرات واضحة. ولكن لو كان هذا كل ما في النسبية لما تأثرت بها الفيزياء التقليدية، ولما كانت هناك حاجة لأعمال أينشتاين؛ غير أن نظرية أينشتاين النسبوية هي نظرية في نسبية الحركة، وفي ذلك تكمن عظمة أثرها في الفيزياء وفي تفكيرنا بوجه عام.

ومع أن المقالة الأولى عن النسبية، التي نشرت مع مقالتين ثوريتين غيرها (سبق أن درسنا إحداهما في الفصل 12)، كانت قد ظهرت في المجلة الفيزيائية **Annalen der Physik** في عام 1905، فقد اتضح من كتابات أينشتاين المتأخرة أن هذه الأفكار عن نظرية النسبية الخاصة بدأت تنبت في تفكيره نحو عام 1900 عندما حيرته بعض خواص سلوك الضوء. وكانت الفيزياء تنمو، كما بينا في فصل سابق، مسرعة وتكشف كثيراً من الخواص الجديدة في المادة والطاقة، ولكن تجربة واحدة ولَّدت هذا الاضطراب والغموض، وأعني بها تجربة ميكلسون ــ مورلي. فهذه التجربة ذات علاقة مباشرة بقبول نظرية النسبية وإن كانت هناك دلائل تاريخية تدل على أن أينشتاين لم يكن على علمٍ بها حين كتب بحثه في النسبية، فمن المفيد إذاً دراسة هذه التجربة.

في عام 1886 بدأ أ. ميكلسون A.Michelson ، حين كان في قسم الفيزياء في جامعة شيكاغو يقوم بتجاربه مع مساعده إ. مورلي E.Morley ، فقاده اهتمامه الكبير بانتشار الضوء وبقياس سرعته في الخلاء إلى أن باستطاعته أن يعين من هذه القياسات سرعة الأرض (في مدارها حول الشمس) بالنسبة إلى «الأثير الموجود في كل مكان» والذي افتُرض في ذلك الوقت أنه إحدى خواص الكون. وكانت نظرية مكسويل الكهرطيسية قد أثبتت أن الضوء ينتشر في الخلاء على صورة أمواج. ولما كان هذا الانتشار بحاجة، كما كان يعتقد، إلى وسط، لذلك افترض أن «الأثير الحامل للضوء» هو هذا الوسط مع أنه ما من تجربة سبق أن أجريت لإثبات ذلك، فعزم ميكلسون على اكتشاف الأثير بأن يقارن سرعة الضوء المتحرك في اتجاه حركة الأرض بسرعة حزمة ضوئية تتحرك في اتجاه متعامد مع حركة الأرض؛ وعندئذ، لن يبرهن الفرقُ بين السرعتين على حركة الأرض فحسب، بل إنه يعطي فعلياً سرعة الأرض في مدارها حول الشمس.

وقد بُنيت هذه التجربة على أساس نظري هو أنه إذا وجد الأثير فإن حركة الأرض فيه تولد تياراً أثيرياً معاكساً لسرعة الأرض مثلما تولد المركبة تياراً هوائياً يجري معاكساً حركتها، فحين تقاس سرعة الضوء على الأرض، فإن تأثرها بتيار الأثير يتوقف على حركة الضوء: هل هي في موازاة حركة الأرض (معها أو بعكسها)، أم هي متعامدة مع التيار. ولا يختلف التحليل هنا أبداً عما يتبع في مثال سابحَيْن متساويَيْ السرعة في نهر، يسبح أحدهما مسافة معينة ذهاباً وإياباً مع النهر، ويبدأ الثاني من النقطة نفسها وفي الوقت نفسه ويسبح المسافة نفسها في اتجاه عرضاني ذهاباً وإياباً. ومن الواضح أنه لا يمكن أن يعود السابحان في وقت واحد إلى النقطة التي بدأا منها، لأن السابح العرضاني يعود قبل صاحبه دائماً؛ وهذا ما يمكن أن يتضح للقارئ من قانون جمع السرعات البسيط. والأمر هو كذلك في حالة الضوء، فإذا انتشر في أثير ثابت يشغل كل مكانٍ في الفضاء فإن الحزمة الضوئية التي تتحرك في اتجاه الأرض ثم تسقط على مرآة تقع على مسافة معينة من المنبع الضوئي وتعود، سيؤُخر وصولَها تيارُ الأثير، المتولد من حركة الأرض، عن وصول حزمة مماثلة تتحرك نحو مرآة على البعد نفسه عن المنبع وتعود في اتجاه متعامد مع حركة الأرض. كان هذا الجهاز الذي أعده ميكلسون ومورلي حساساً إلى حدٍ بعيد، وكان مهيأ لأن يكشف فرقاً في زمن الوصول بين الحزمتين حتى وإن كانت سرعة الأرض حول الشمس ميلاً واحداً بدلاً من سرعتها الفعلية $18\frac{1}{2}$ ميل في الثانية. ولكنهما لم يكتشفا فرقاً من أي نوع كان سوى خيبة أمل ميكلسون المريرة، لأنه ظن أن التجربة قد أخفقت، وخلص إلى أن التجربة كما صُممت لا يمكن أن تكشف حركة الأرض.

ومع أن ميكلسون أهمل تجربته وصرف النظر عنها لكونها لا معنى لها، فقد رأى فيزيائيون آخرون في ذلك الوقت أن انعدام النتيجة فيها هو إعلان مهم جداً عن الطبيعة، لكنهم لم يكونوا

يعرفون ما أهميته. وهنا قام لورنتز بإجراء محاولة لتفسير هذه «اللا نتيجة» ضمن إطار الفيزياء التقليدية وذلك باستخدام نظريته في إلكترونات المادة؛ ولا تهمنا تفاصيل تحليله الرائع جداً المعقدة، وإنما المهم هو نتيجته الغريبة، إذ أظهر تحليله أن الإلكترون الكروي المتحرك يتفلطح نوعاً ما في اتجاه حركته بسبب خواصه الكهربائية، وأنه كلما أسرع في حركته ازداد هذا التفلطح؛ لذلك فكر لورنتز بأن المادة، لكونها مؤلفة من إلكترونات، تتفلطح إلى حدٍ ما على طول خط حركتها إذا كانت متحركة. ثم استخدم هذا التحليل نفسه في تفسير النتيجة السلبية لتجربة ميكلسون ومورلي، وأعلن أن مسار الضوء الموازي لحركة الأرض نحو المرآة ذهاباً وإياباً، يتقلص فيؤدي ذلك إلى أن ذهاب الحزمة الضوئية وعودتها في اتجاه حركة الأرض يستغرق زمناً مساوياً لزمن الحزمة الأخرى العمودية. والجزء اللافت للنظر في هذا التحليل هو أنه يقرر أن التقلص في خط الحركة يساوي بالتحديد الكمية الصحيحة، اللازمة لإبطال التأخير الناتج عن تيار الأثير، لزمن ذهاب الحزمة الضوئية وعودتها في حركتها الموازية لتيار الأثير. ويعرف هذا الأثر باسم فرضية فِتْزجيرالْد ـــ لورنتز في التقلص، لأن الفيزيائي النظري البريطاني فتْزجيرالد كان قد اقترح، في الوقت نفسه تقريباً، فرضية تقلص مماثلة على وجه التقريب.

ولم تؤخذ فرضية التقلص مأخذ الجد، لأنها كانت تبدو أشبه ما تكون بمؤامرة بين الجسيمات المشحونة المكوِّنة للمادة لكي تقلِّص تأثيراتُها المتبادلة أحدَ ذراعيْ جهاز ميكلسون ـــ مورلي (الموازي لحركة الأرض) بكمية مناسبة تماماً لكي تعطي هذه النتيجة السلبية التي وجدها المجربان. ولذلك ظلت هذه «اللا نتيجة» قذى في عيون الفيزيائيين النظريين إلى أن فسرها أينشتاين تفسيره الرائع في مقالته الأولى التي أعلنت ظهور نظرية النسبية الخاصة، فأحدثت هذه المقالة ثورة من الطراز الأول في مفاهيمنا عن المكان والزمان وعن قوانين الطبيعة، وكان صداها في العلم أبعد من أن يقدر.

ولم يطور أينشتاين نظريته النسبوية الخاصة لكي يفسر النتيجة السلبية لتجربة ميكلسون ومورلي، فهو لم يكن يعرف هذه التجربة عندما توصل إلى نظريته، حتى أنه كان في حقيقة الأمر بعيداً عن مجرى الأحداث الهامة في الفيزياء حينذاك، ولم يكن يعرف أحداً من الفيزيائيين على الإطلاق، ولكنه كان يعرف نظرية مكسويل الكهرطيسية وكان منغمساً بعمق في محاولة فهم طبيعة الضوء ولا سيما حركته. وكان يحفزه في عمله أيضاً معنى الوحدة التي كان يراها في قوانين الطبيعة وإدراكه بأن هذه الوحدة تعني أن قوانين الأجسام المتحركة (ميكانيك نيوتن) وقوانين البصريات (انتشار الضوء) لا بد أن تكون مبنية على أساسٍ واحد في الطبيعة، أي مجموعتيْ القوانين لا بد أن تكون محكومة بالمبادئ الشاملة نفسها، وكان بوجه خاص على قناعة بأنه إذا كانت قوانين الميكانيك تبدو هي نفسها لجميع المراقبين بغض النظر عن حركات بعضهم بالنسبة إلى بعض، فلا بد أن

تكون كذلك قوانين البصريات، وهذا هو جوهر مبدأ أينشتاين الشهير في صمود قوانين الطبيعة الذي سنشرحه فيما بعد بتفصيل أكثر.

ولكي يتضح لنا معنى هذا المبدأ، دعونا ننظر في بعض التجارب الميكانيكية (كأن نراقب أشياء طائرة، أو نقذف بعض الأشياء أو نتحرك من مكان إلى آخر ...) ثم لنحاول من مراقبتنا لسلوك هذه الأشياء تحديد حركتنا في الفضاء. إننا سنجد أنه مهما تأنينا في مراقبتنا لها فإننا لن نكتشف شيئاً في سلوكها يدلنا على أننا فوق كوكب متحرك أو ساكن. ولا يختلف الأمر عن ذلك أبداً إذا كنا في مركبةٍ (قطار أو طائرة) تتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم — إذ لن نتمكن من اكتشاف حركتنا المنتظمة (أي حركتنا بسرعة ثابتة في خط مستقيم) بأي ملاحظة في داخل المركبة. والسبب في ذلك هو استقلال قوانين نيوتن في الحركة عن حركة المراقب المنتظمة، أي لا يمكن أن تتغير هذه القوانين عندما ينتقل المراقب من مرجع إلى آخر يتحركان بانتظام (تغير الإحداثيات)؛ فهذا أمر مسلَّم به من الخبرة التي تكونت نتيجة لتعرضنا الدائم لحوادث من هذا القبيل، ولا سيما حين تنطلق الطائرة بسلاسة، فكيفما كان سلوك أي شيء في الطائرة فإننا نستطيع البقاء هادئين في مكاننا.

ولقد نقل أينشتاين هذه الأفكار إلى الظواهر الضوئية وأقنع نفسه بأن قوانين الضوء ليست أقدر من قوانين الميكانيك على كشف حركتنا المنتظمة، وهذا يعني كما لاحظ أينشتاين أنه لا يمكن أن تكون لمعادلات مكسويل التي تصف انتشار الأمواج الكهرطيسية (الضوء) علاقة بحركة الراصد المنتظمة، ولكن هذه المعادلات تحوي سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية، أي سرعة الضوء، ولا يمكن لهذه السرعة أن تتعلق بحركة الراصد، لأنها لو كانت متعلقة بها، لأمكن للظواهر الضوئية، ومن ثم لمعادلات مكسويل، أن تفيدنا في تعيين حركة الشيء المطلقة في الفضاء، كأن نستعين بتجربة كتجربة ميكلسون ومورلي، أو بأي تجربة ضوئية أخرى. ولذلك رأى أينشتاين أنه يجب أن تكون سرعة الضوء في الخلاء مستقلة عن حركة المنبع الضوئي وعن حركة الراصد، أي لا يمكن أن تتوقف سرعة الضوء التي يقيسها أي راصد على حركته بالنسبة إلى المنبع الضوئي، وهذا يعني ثبات سرعة الضوء، هذا الثبات الذي كان له أثر هائل في الفيزياء ولا سيما في مفهومي المكان والزمان.

وهكذا أصبح لدى أينشتاين مفهومان باعثان على الاكتشاف (ثبات سرعة الضوء وصمود قوانين الطبيعة)، وهما اللذان قاداه إلى نظريته النسبوية الخاصة (أو المقصورة Restricted) التي استبدلت بميكانيك نيوتن الميكانيكَ النسبوي، والفرق بين الاثنين من وجهة نظرٍ صورية هو أن قوانين نيوتن لا تتضمن الثابت الكوني، سرعة الضوء، أو تستند إليه، في حين تتضمنه القوانين

النسبوية ، وهو علامة مميزة موجودة في كل صيغها . وكما يعلن وجود ثابت بلانك h (أو ثابت الفعل) عن نظرية الكم ، كذلك يعلن وجود سرعة الضوء c عن نظرية النسبية ؛ لذلك تتضمن كل عبارات القوانين كلا الثابتين لأن قوانين الطبيعة كلها موافقة لكلا النظريتين : الكم والنسبية .

وقد اتجه أينشتاين نتيجة لافتراضه ثبات سرعة الضوء إلى تحليل مفهومي المكان والزمان المطلقين تحليلاً شاملاً أقنعه في النهاية أن هذه المفاهيم لا يمكن الاحتفاظ بها إذا كانت سرعة الضوء ثابتة ، ولكي يثبت ذلك بما يرضيه ، كان عليه أن يبرهن بأن تواقت حادثين منفصلين في المكان ليس له معنى مطلق ، بل يتعلق بحركة المراقب ، فأجرى ، لهذا الغرض ، إحدى أشهر تجاربه الفكرية ، ولكن مفاهيم هذه التجربة مرهقة إلى حدٍ ما ، لذلك سنصف تجربة فكرية أخرى تبين أن كلاً من المكان والزمان ليس مطلقاً ، أو بمعنى آخر ، تختلف المسافات والفترات الزمنية كما يقيسها مراقبان إذا كان أحدهما يتحرك بالنسبة إلى الآخر .

وتتضمن تجربتنا الفكرية راصدين يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر ويريدان قياس سرعة الضوء ، ومعهما ميقاتيتان متماثلتان ومسطرتان طول الواحدة 186000 ميل (فكرة غير معقولة ولكنها تبسط التحليل) . يقف أحد المراقبيْن على رصيف سكة الحديد ومعه مسطرته التي يجعلها موازية لخط السكة (الذي نتصوره ممتداً في خط مستقيم مسافة 186000 ميل على الأقل ، فهو لذلك ممتد بعيداً في الفضاء مما يجعل تجربتنا الفكرية خيالية تماماً) . أما الراصد المتحرك فمعه أيضاً مسطرته الموازية للسكة ، وهو في عربة مفتوحة تتحرك على السكة من اليسار إلى اليمين بالنسبة إلى الراصد الثابت بسرعة 185000 ميل في الثانية . ويحاول كل مراقب قياس سرعة الضوء بمسطرته وميقاتيته فيسجل مدة انتقال حزمة ضوئية من طرف مسطرته إلى طرفها الآخر ويسجل نتائج قياساته وحسابه .

ولنفرض لتسهيل الأمور أن عمليات القياس تبدأ عندما يلاحظ الراصد الثابت أن طرفيْ المسطرتين الأيسرين بالنسبة له قد انطبقا ، ولنفرض أن شعاعاً ليزرياً ، آتياً من مكان بعيد من اليسار إلى اليمين ، وصل في هذه اللحظة نفسها إلى الطرفين الأيسرين المنطبقين من المسطرتين وأنه أطلق عمل الميقاتيتين . فيا ترى ما هي سرعة شعاع الليزر التي سيجدها كلٌ من الراصدين؟ سيجد الراصد الثابت بعد متابعته الشعاع أن الشعاع وصل إلى طرف مسطرته الأيمن عندما دقت ميقاتيته ثانية واحدة ، فسرعة الضوء بالنسبة له هي 186000 ميل في الثانية . ولكن ما الذي سيجده الراصد المتحرك ؟ إنه سيتابع الشعاع على طول مسطرته ويلاحظ أنه حين وصل الشعاع إلى الطرف الأيمن الآخر دقت ميقاتيته ثانية واحدة ، وهكذا سيسجل أن سرعة الضوء كما قاسها هي 186000 ميل في الثانية ، وهذا ما يتفق تماماً مع واقع الطبيعة بأن كل مراقب يجب أن يجد سرعة الضوء 186000 ميل في الثانية . ولكن لو وقفنا على رصيف السكة لكي نراقب التجربة وكنا لا نعرف سوى المفاهيم

النيوتنية ، لبدا لنا إعلان الراصد المتحرك عديم المعنى ومخالفاً للمنطق البدائي « وللحس العام » .

ولكي نفسر تصرفنا هذا حين نكون مراقبين نيوتنيين ، دعونا نُشِر إلى أن تفكيرنا النيوتني (إذا لم نقم بأي ملاحظة) سيتجه إلى أن الطرف الأيمن من المسطرة المتحركة كان قد تقدم 185000 ميل في ثانية واحدة من زماننا (وهي سرعة العربة) ، ولذلك فإن حزمة الليزر ، التي تكون قد بلغت في أثناء ذلك الطرف الأيمن من المسطرة الثابتة (أي قطعت 186000 ميل من السكة) ، يكون لا يزال أمامها بحسب تصورنا النيوتني 185000 ميل أخرى لكي تبلغ الطرف الأيمن من المسطرة المتحركة ، لذلك نميل ، إذا لم نلاحظ الحوادث في العربة المتحركة ، إلى رفض إعلان الراصد المتحرك ، ظناً منا بأنه أخطأ خطأً فادحاً ، لأنه ما من تفسير آخر يبدو معقولاً في المرجع المكاني ـــ الزماني النيوتني .

ولإزالة كل شك ، تعاد التجربة ، ولكن على الراصد الثابت أن يراقب الآن كل أوجه نشاط الراصد المتحرك وأن لا يترك الميقاتية والمسطرة المتحركتين تغيبان عن نظره ، وهنا أيضاً ترد حزمة الليزر إلى كلا الطرفين الأيسرين من المسطرتين (أو القضيبين) في آن واحد (أي لحظة الصفر في كل ميقاتية) ، وتصل إلى الطرف الأيمن من القضيب الثابت حين تسجل الميقاتية الثابتة مرور ثانية واحدة ، ولكن الطرف الأيمن من القضيب المتحرك لا يكون عندئذ على بعد 185000 ميل إلى اليمين بل على بعد يقارب عُشر هذه المسافة ، كما أن الميقاتية المتحركة لا تسجل مرور ثانية واحدة بل نحو عُشْر ثانية فحسب . وهكذا فإن الراصد الثابت يرى أن المرجع المكاني ـــ الزماني عند الراصد المتحرك ليس هو نفسه في مرجعه ، إذ يجب أن تتعدل المسافات والزمن في كل مرجع على نحو ملائم لكي يعطي قياس سرعة الضوء بالقيمة نفسها ، لهذا تتقلص القضبان المتحركة وتبطيء الميقاتيات المتحركة وتكون آثار ذلك متبادلة عند مراقبيْن يرصد كل منهما الآخر ، لأن ما يهم في الأمر هو الحركة النسبية وحدها ، فيستطيع كل من الراصدين أن يعد نفسه ساكناً والآخر متحركاً ، لذلك يلاحظ كل منهما أن الأطوال تتقلص والزمن يتباطأ في مرجع الآخر .

وتنشأ هذه الظواهر كلها عن ثبات سرعة الضوء في الخلاء بالنسبة إلى جميع المراقبين الذي يتحرك أحدهما بالنسبة إلى الآخر بسرعة ثابتة في خط مستقيم ، لذلك كان يعني هذا الثبات عند أينشتاين أنه لا المكان ولا الزمان كيان مطلق ، أو بمعنى آخر تتوقف المسافة والمدة الزمنية بين حادثين على حالة الراصد الحركية بالنسبة إلى الحادثين ، فقد يبدو الحادثان لأحد الراصدين متزامنين في حين يبدو لراصد آخر أن أحدهما وليكن A يسبق الثاني B ، ويبدو بالنسبة إلى راصد ثالث أن B يسبق A . وعلاوة على ذلك ، قد تختلف المسافة بين الحادثين عند كل راصد عما هي عند الآخرين ، لذلك كان ثبات سرعة الضوء أحد أركان القاعدة التي شيد عليها أينشتاين نظرية النسبية الخاصة . وأهمية هذا الثابت ، فيما يخص قوانين الفيزياء ، هي أن سرعة الضوء c من الثوابت الهامة مثل ثابت بلانك (كم الفعل) ، وثابت الثقالة G (في قانون نيوتن) ، وهي ثوابت استخدمتها الطبيعة لبناء

الكون، وهي لكونها كذلك لا بد أن ترد في جميع قوانين الطبيعة؛ فإذا كان الثابت c (سرعة الضوء) لا يظهر في قانونٍ مثل قانون نيوتن في الحركة F = ma، فإن هذا القانون لا يكون كاملاً لأنه لا يتفق مع متطلبات النسبية، لذلك يجب أن يوسع (يستكمل) لكي يصبح كذلك؛ وإذا تم ذلك قلنا إن القانون أصبح عندئذ صامداً نسبوياً وأنه لهذا السبب أصبح يفصح عن حقيقة أسمى مما كان من دون كماله النسبوي، وهذا ما يقودنا إلى الركن الآخر في بناء نظرية أينشتاين، وهو مبدأ الصمود Invariance.

لم يكن أينشتاين أول من أدخل مفهوم الصمود، فقد أدخله نيوتن، ولكن الطريقة التي أدخله بها أينشتاين واستخدمه لبناء نظريته النسبية الخاصة والعامة، كانت جديدة فعلاً ومفيدة إلى حد بعيد. ولكي نتبين ذلك، دعونا نعرِّف «الصمود» أولاً وفقاً للطريقة التي يستخدم بها الفيزيائيون هذا التعبير، فلنتأمل ثانية ــ لتحقيق هذا الغرض ــ طبيعة أحد قوانين الفيزياء، ولنبدأ بتعريف الحادث بأنه انطباق جسم (إلكترون مثلاً أو فوتون) على نقطة من الفضاء في لحظة معينة. فلكي نحدّد حادثاً معيناً يجب أن نعرف متى وقع وأين، وهذا يعني أنه يجب أن يكون لدينا مرجع مقارنة (مجموعة إحداثيات) لكي نحدد موضع الحادث وميقاتية لتعيين لحظة وقوعه. ولما كان مرجع المقارنة يتألف من ثلاث مجموعات من الخطوط (المستقيمة أو المنحنية) المتوازية التي تكوِّن في الفضاء شبكةً تقسمه إلى مكعبات صغيرة جداً، نستطيع أن نحدد موضع الحادث في الفضاء بتعيين موضعه في هذه الشبكة بالنسبة إلى أي نقطة منها نسميها مبدأ إحداثياتنا، وتكون خطوط الشبكة الثلاثة (كل واحد من مجموعة) المتقاطعة فيها هي محاور الإحداثيات، فلكي نحدّد موضع حادث معين، يجب أن نعطي ثلاثة أعداد (هي إحداثيات الحدث في شبكتنا)، أي على غرار ما نعطي ثلاثة أعداد لتعيين موضع شخص في بناء ــ رقم غرفته في البناء ورقمان آخران يدلان على عنوان البناء وهما رقم الشارع ورقم البناء ــ ولتحديد زمن وقوع الحادث نحتاج إلى ميقاتية، لذلك يتعين أي حادث بأربعة أعداد هي إحداثياته المكانية الثلاثة وزمن وقوعه. أما حركة الجسم فتوصف بأنها مجموعة من الحوادث (أو مجموعة من رباعيات الأعداد)، فيكون مسار الجسم منحنياً يصل بين هذه الحوادث. أما القانون فهو النص العام الذي يتضمن المكان والزمان ويمكّننا من الربط بين الحوادث، فيؤدي بهذه الطريقة إلى استنتاج مسارات الجسيمات. ولما كان القانون لا يعالج حوادث فردية (نوعية) بل يعالج خواص الطبيعة الذاتية فهو لذلك يجب أن يظل هو نفسه بالنسبة إلى جميع المراقبين بغض النظر عن مراجع المقارنة، وهذا هو جوهر مبدأ الصمود.

ولكي يتضح هذا المبدأ بأبسط طريقة ممكنة، دعونا نتصور راصديْن يتحرك كل منهما بالنسبة إلى الآخر بمتجه سرعة ثابت (أي بسرعة ثابتة واتجاه ثابت)، فيقودنا قصر الحركة النسبية للراصدين على سرعة ثابتة إلى نظرية النسبية الخاصة (المقصورة). لنتصور أن الراصدين يدرسان مجموعة

الحوادث نفسها لكي يستنتجا قوانين الحركة الأساسية كما فعل غاليليو ونيوتن. إن كلاً منهما سوف يصف الحوادث في مرجعه الخاص، ومن ثم بدلالة مجموعاته الخاصة من رباعيات الأعداد (أي الإحداثيات المكانية الثلاثة عنده وزمن وقوع كل حادث)؛ لذلك سيكون الوصفان مختلفين بوجه عام، ولكن القانون الذي سيتوصل إليه كل منهما أياً كان (وليكن قانوناً في الحركة)، إذا كان صحيحاً فعلاً، يجب أن يكون هو نفسه بمضمونه وصيغته الرياضية. فيقتضي مبدأ الصمود إذاً أن أي حكم بشأن مجموعة من الحوادث في الطبيعة، إذا ظل على حاله دونما تغير عندما نعبّر عنه في مختلف المراجع، فإنه يكون عندئذ حقيقة صميمية (متأصلة) في الطبيعة، ومن ثم يكون قانوناً. فهذا المبدأ إذاً، كما هو واضح، محكٌّ عقلي حاسم للتفريق بين الحقائق الصميمية في الكون (الحقائق الأساسية أو القوانين) والحقائق الظاهرية أو السطحية.

ولتبيين مبدأ الصمود بصورة أدق، دعونا نعتبر «قانوناً» صاغه أحد المراقبين (المراقب 1) ولننظر هل يظل على حاله أم يتغير عندما نترجمه إلى لغةِ (أو مرجع) المراقب الآخر (المراقب 2)، إذ لن يكون قانوناً إلا إذا ظل على حاله. ولنلاحظ، زيادة في الإيضاح، أن المراقب الأول ينص على هذا القانون بدلالة مرجعه الخاص، أي بدلالة مجموعته من رباعيات الأعداد (ثلاثة للمكان وواحد للزمن). فللتعبير عن هذا القانون في مرجع المراقب الثاني يجب أن يكون لدينا خطة رياضية لترجمة إحداثيات المكان والزمان (المرصودان) عند المراقب الأول إلى تلك التي عند المراقب الثاني، وهذا هو تحويل الإحداثيات وهو من أهم مفاهيم الفيزياء.

ويتجلى هذا التحويل أساساً على صورة مجموعة من المعادلات الجبرية التي تربط إحداثيات حادثٍ ما: المكانية z, y, x والزمانية t، كما ترصد من مرجع ما، بإحداثيات هذا الحادث: المكانية z', y', x' والزمانية t'، كما ترصد من مرجع آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول بسرعة v. وتتوقف طبيعة هذه المعادلات على هندسة المكان والزمان، أي أن تبنّي هذا المفهوم للفضاء أو ذاك يعني الحصول على مجموعة تحويلات أو أخرى؛ فمفهوم المكان ـــ الزمان في الفيزياء النيوتنية مثلاً هو مفهومٌ إقليدي (هندسة مسطحة)، والمكان والزمان مطلقان، وهذا ما يتسق مع الاعتقاد (المقبول كلياً في فيزياء نيوتن) بأن سرعة الضوء التي يرصدها مراقب ما تتوقف على حركة هذا المراقب بالنسبة إلى نوعٍ مرجعي ثابت إطلاقاً كان يُفترض أنه الأثير (وهو الوسط الذي افترض أن الضوء ينتشر فيه)، فكانت معادلات التحويل (التي تِدعى التحويلات الغاليلية) بسيطة جداً، تبعاً لهذه الافتراضات، ولا تحوي سوى السرعة النسبية v للمراقبيْن، فالزمان هو نفسه عندهما؛ أما الإحداثيات المكانية للحادث فتتغير، لأن الحوادث نفسها تبدو في أوضاع مختلفة بسبب الحركة النسبية للمراقبيْن. ومع ذلك فإن المكان مطلق بمعنى أن المسافات بين الحوادث تبدو هي نفسها عند المراقبيْن.

أما في فيزياء أينشتاين النسبوية، التي بُنيت على واقعٍ مؤكد هو ثبات سرعة الضوء بالنسبة

إلى جميع المراقبين، فإن معادلات التحويل (أو تحويلات أينشتاين ــ لورنتز) أكثر تعقيداً من التحويلات الغاليلية، وتحوي، إضافة إلى السرعة النسبية v، سرعة الضوء c؛ فهي تتميز في الحقيقة بوجود المعامل $\sqrt{1-\frac{V^2}{C^2}}$ الذي يعد علامة مميزة في نظرية النسبية وأشهر وأعمق عبارة في قصة قصة الفيزياء. كما تطبق معادلات التحويل على المكان والزمان على السواء، فيعامل المكان والزمان في نظرية النسبية على قدم المساواة ويصبحان محبوكين بطريقة تُظهر أنه لا المكان وحده مطلق ولا الزمان وحده مطلق.

ولكن قولنا إن كلاً من المكان والزمان ليس مطلقاً بمفرده، لا يعني أن النسبية ليست نظرية الأشياء المطلقة، بل إن الحقيقة المطلقة فيها أعلى مستوى مما في فيزياء نيوتن، لأنها تمزج المكان بالزمان في زمكان (مكان ــ زمان) متشعب الجوانب المطلقة. ولكي نوضح ذلك، نلاحظ أولاً أن كلاً من المسافة بين حادثين والمدة الزمنية الفاصلة بينهما هي نفسها، وفقاً لفيزياء نيوتن، بالنسبة لجميع المراقبين (أي المدة مطلقة والمسافة مطلقة)؛ أما في نظرية النسبية فيجد المراقبون المختلفون (أي الذين يتحرك كل منهم بالنسبة إلى الآخر) مسافاتٍ مختلفة ومدداً مختلفة. ومع ذلك تعلمنا النسبية أن مزيجاً معيناً للمكان والزمان الفاصلين بين حادثين يكون واحداً بالنسبة إلى جميع المراقبين، وللحصول على مربع هذه الفاصلة الزمكانية المطلقة بين أي حادثين، نربع المسافة r بين الحادثين ونطرح منها مربع الجداء ct، حيث t المدة الزمنية بين الحادثين وc سرعة الضوء في الخلاء، فنحصل على المقدار $r^2 - c^2t^2$. إن هذا المقدار مطلق، بمعنى أن جميع المراقبين الذين يتحرك كل منهم بالنسبة إلى الآخر حركة مستقيمة منتظمة سيجدون القيمة نفسها لهذا المقدار.

والحقيقة، إن هذه العبارة البسيطة ($r^2 - c^2t^2 =$ ثابت بالنسبة إلى جميع المراقبين) تتضمن كل شيء في النسبية الخاصة وتؤدي إلى فيزياء الزمكان الرباعي الأبعاد التي طرحها أينشتاين بديلاً عن فيزياء نيوتن الثلاثية الأبعاد. ويمكن للمرء أن يتحول من فيزياء نيوتن إلى فيزياء النسبية بأن يضع مكان قوانين نيوتن، التي تشمل علاقات بين متجهات ثلاثية الأبعاد، قوانين أخرى تشمل متجهات رباعية الأبعاد، أي متجهات يتألف كل منها من ثلاثة أبعاد للمركبة المكانية وبُعدٍ واحد للمركبة الزمانية. والمثال الأساسي على هذا النوع من المتجهات هو الفاصلة الزمكانية.

ويمكن أن يُستنتج من صمود الفاصلة الزمكانية، التي سبق ذكرها، كل النتائج الهامة التي تنبثق عن نظرية النسبية الخاصة، منها مثلاً تقلص القضبان المتحركة في اتجاه حركتها، وتقصير الميقاتيات المتحركة، وتزايد كتلة الجسم المتحركة، وتكافؤ الكتلة والطاقة كما عبر عنه أينشتاين في معادلته الشهيرة $E = mc^2$ (طاقة أي كتلة تساوي جداء قيمتها m في مربع سرعة الضوء). أما كيف تؤثر هذه النظرية في قوانين الفيزياء فهذا ما يسهل رؤيته من مثال انحفاظ الطاقة والاندفاع؛ ففي الفيزياء النيوتنية ينحفظ الاندفاع وحده والطاقة وحدها وكذلك الكتلة؛ ولكن ذلك غير

صحيح في نظرية النسبية، لأن الاندفاع ثلاثي الأبعاد، أما الطاقة والكتلة فوحيدتا البعد، وهذا يتناقض مع شرط النسبية وهو أن القوانين (التي تتضمن مبادئ الانحفاظ) يجب أن تكون أحكاماً على متجهات رباعية الأبعاد. ويتحقق متجه كهذه المتجهات بضم الاندفاع والطاقة؛ وبذلك تتحد مبادئ الانحفاظ الثلاثة في مبدأ انحفاظ واحد في الفيزياء النسبوية هو مبدأ انحفاظ الطاقة ــ الاندفاع ــ الكتلة . ويؤدي هذا المبدأ مباشرة إلى معادلة أينشتاين في تكافؤ الكتلة والطاقة الذي كان له أثر هائل في العلم والتقانة (التكنولوجية).

ولما كانت نظرية النسبية الخاصة قد أدخلت الزمكان الرباعي الأبعاد، يجدر بنا أن نرى ما هي طبيعة هندسة الزمكان التي تتعين بالفاصلة الزمكانية بين حادثين متجاورين. فالهندسة في فيزياء نيوتن هي هندسة إقليدية ثلاثية الأبعاد (منبسطة) وتتعين كلياً بعلاقات مكانية ليس للزمن دور فيها، ويعبَّر فيها عن مربع المسافة بين حادثين، أي r^2، بدلالة إحداثيات الحادثين في مرجع إحداثيات المراقب ويعطى بمجموع مربعات مركبات المسافة (أي إحداثياتها): $r^2 = \chi^2 + y^2 + z^2$ (نظرية فيثاغورس)؛ وهذا التعبير البسيط عن مربع المسافة هو العلاقة المميزة للهندسة الإقليدية المنبسطة، في حين أن الانتقال منه إلى النسبية الخاصة يتم بإضافة الحد c^2t^2ــ إلى العبارة السابقة فنحصل بذلك على الفاصلة الزمكانية $\chi^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ التي تميّز الهندسة الإقليدية (المنبسطة) الرباعية الأبعاد. وهكذا تجري عمليات النسبية الخاصة، مثل فيزياء نيوتن، بهندسة إقليدية ولكن مع فارق ضئيل يجدر بنا ملاحظته بين الهندستين الإقليديتين: ففي الاثنتين تظهر الحدود χ^2 وy^2 وz^2 في صيغة المسافة بإشارة موجبة، أما حد الزمن فيظهر (في النسبية الخاصة) بإشارة سالبة، وهي إشارة لها دور حاسم بالنسبة إلى كل نتائج نظرية النسبية الخاصة، ويدعى مسار الجسيم في زمكان هذه الهندسة الاقليدية الجديدة «الخط الكوني».

نظرية النسبية العامة

في عام 1916 وبعدما يقرب من عشر سنوات على نشر نظرية النسبية الخاصة، نشر أينشتاين بحثه عن نظرية النسبية العامة في مجلة أكاديمية العلوم في برلين، وكان بحثاً مقتضباً نسبياً ولكنه يمثل عشر سنوات قضاها أعظم عقل في القرن العشرين في التفكير الشديد والخارق، وهو في حقيقته يشغل أعلى ذرى إبداع الإنسانية العقلي. ولا شك أن أينشتاين، في سبيل الوصول إلى هذه النتيجة، كان مدفوعاً برغبته الشديدة في إنجاز أعظم تركيب عقلي. وكان دافعه إلى ذلك هو أن نظريته النسبية الخاصة، أو المقصورة كما يشار إليها عادة، كانت قد تركت قصة المكان والزمان مبتورة ناقصة.

وكان أينشتاين يبحث كما قلنا عن صيغة لتوحيد قوانين الفيزياء، فرأى أن في مبدأ الصمود

طريقه إلى ذلك ، لأن قوانين الطبيعة كلها يجب أن تتمتّع بخاصة بقائها على حالها بالنسبة إلى جميع المراقبين بغض النظر عن مراجعهم (أي عن حالاتهم الحركية) ، أو بعبارة أخرى مختلفة ، لا يجوز أن يكون في قوانين الطبيعة ما يتيح للمراقب أن يعين حالته الحركية . ولكن أينشتاين لم يبلغ هذا الهدف كاملاً في نظريته النسبية الخاصة ، لأنها لا تنطبق إلا على ما يدعى «المراقبون العطاليون» (أي المراقبون الذين يتحرك أحدهم بالنسبة إلى الآخر بمتجه سرعة ثابت) ؛ فهذه النظرية تميِّز إذاً المراجع العطالية وكأنها هي المراجع التي تفضلها الطبيعة للتعبير عن القوانين الطبيعية . وقد رأى أينشتاين أن هذا الحصر لنمط المراجع الإحداثية ، التي تصاغ فيها القوانين بالمراجع العطالية ، عيبٌ في نظريته ، لأنه كان عميق الإيمان بأن جميع مراجع المقارنة ، بغض النظر عن طريقة حركتها ، متكافئة في نظر الطبيعة ، سواء أكانت تتحرك حركة مستقيمة منتظمة ، أم متسارعة بأي تسارع كان ، وهذا يعني أنه يجب أن لا يكون الإنسان قادراً على معرفة حالته الحركية ، مهما كان القانون الذي يطبقه (أي بأي رصد كان يعتمد عليه) على حوادث تجري داخل مرجعه أو خارجه .

إن أول ما يتبادر إلى ذهننا تجاه هذه الدعوى هو أنها لا يمكن أن تكون صحيحة وأن أينشتاين سيُخفق في محاولة تعميم مبدأ النسبية ليشمل الحركة المتسارعة . ونحن نعتمد في ذلك على تجربتنا التي تقول : إنه لا يمكن أن نكتشف حركتنا غير المتسارعة ، لأن جميع الأشياء تتحرك في مرجعنا حركة واحدة (أي تتصرف الأشياء كلها وكأننا لا نتحرك) ، في حين أننا نستطيع اكتشاف حركتنا المتسارعة مباشرة ، لأن الأشياء المحيطة بنا لا تتحرك وفقاً لقانون نيوتن الأول في الحركة ، بل تتصرف بطريقة تختلف كل الاختلاف عن الطريقة التي تتصرف بها حين يكون مرجعنا ساكناً أو متحركاً بحركة مستقيمة منتظمة . وهكذا تبدو الحركة المتسارعة كأنها مطلقة ، فلو بدأت الغرفة التي نحن فيها بالدوران لارتمينا جميعاً على الجدران واستنتجنا حالاً ، من دون أي ملاحظة أخرى ، أن مرجعنا يدور ؛ أو إن لم يكن ذلك ، فإننا نستنتج من قانون نيوتن الثاني أن غرفتنا لا تدور وإنما تُوقِعُنَا كلنا إلى الجدران قوة خفية من نوعٍ ما ؛ ولكننا ننبذ ذلك طبعاً ونستنتج نتيجة «معقولة» ، وهي أننا في مرجع متسارع . ولكن أينشتاين لم يقبل أن يكون هذا المفهوم «الحسي الشائع» عائقاً أمام مسيرته إلى تعميم النسبية فراح يعزو إلى كافة نظم الإحداثيات (مراجع المقارنة) ، بغضّ النظر عن حركاتها ، مكانة واحدة بقدر ما وجد أن لقوانين الفيزياء مكانه واحدة . وقد استفاد أينشتاين في حقيقة الأمر من ملاحظة أن الأجسام تتصرف في المرجع المتسارع وكأنها تخضع لقوة دعاها «قوة العطالة» لكي يعلن نظريته العامة .

وقد بدأ أينشتاين عند بناء نظريته النسبية العامة بملاحظة عامة جداً ، كان غاليليه أول من لاحظها قبله ، وهي أن جميع الأجسام التي تسقط سقوطاً حراً من ارتفاع معين تتحرك بتأثير ثقالة الأرض بتسارع واحد مهما كانت كتلها ، كما لاحظ أيضاً أن جميع الأجسام الموجودة في مرجع

متسارع تستجيب لهذا التسارع بالطريقة نفسها مهما كانت كتلها ، لذلك طرح ، اعتماداً على هاتين الملاحظتين ، مبدأً يعد من أهم مبادئ الفيزياء وهو مبدأ التكافؤ الذي ينص على أنه لا يمكن تمييز قوى العطالة من قوى الثقالة ، فأصبح هذا المبدأ أساس نظرية النسبية العامة ، لأنه نفى إمكان تعيين حالة الشيء الحركية بملاحظة قوى العطالة أو اكتشافها (سواء أكان مرجعنا متسارعاً أم لا) .

ويمكن أن نتابع تفكير أينشتاين على نحو أفضل بأن نستعرض باختصار تجربته الفكرية الشهيرة التي يتخيل فيها مراقباً في مصعدٍ كان في بادئ الأمر معلقاً فوق الأرض ساكناً ؛ ففي هذه الحال كانت جميع التجارب التي يجريها المراقب تتفق اتفاقاً تاماً مع تجارب مراقب يعمل خارج المصعد على الأرض فيستنتج مثله أن هناك قوة متجهة إلى أسفل تشد جميع الأجسام الموجودة في المصعد نحو أرضه ويدعوها ثقالة . لنقارن هذا الوضع مع وضع المراقب نفسه بعد نقله فجأة مع مصعده إلى مكان بعيد عن الأرض وعن كل جسم ذي كتلة ، فلو أخذ المصعد يتحرك حينئذ باستمرار حركة متسارعة تتجه من أرضه إلى سقفه بتسارع مقداره 32,2 قدماً في مربع الثانية (أي بتسارع الأجسام نفسه على سطح الأرض) ، لوجد المراقب أن جميع الأجسام لا تزال تتصرف بالطريقة التي كانت عليها عندما كان مصعده معلقاً فوق الأرض ، ولظل على استنتاجه ، إذا كان منطقياً مع نفسه ، بأن مصعده ثابت وأن الأجسام مشدودة فيه إلى « أسفل » بقوةٍ ثقالية . وهذا هو المدلول الفيزيائي لمبدأ التكافؤ ، فهو يجنب المرء أن يستنتج بأنه موجود في مرجع متسارع ، لأن كل الآثار الناجمة عن هذا التسارع تماثل كلياً تلك التي تنجم عن الثقالة في مرجع ساكن أو يتحرك حركة مستقيمة منتظمة في حقل ثقالي . وهكذا يدعم مبدأ التكافؤ وجهة نظر أينشتاين بأنه لا يمكن أن نفرّق بين الحركة المتسارعة والحركة غير المتسارعة ، لأن قوى العطالة الناجمة عن التسارع هي نفسها الناجمة عن الثقالة ، فلا يستطيع المراقب أن يعرف من ملاحظته للأجسام (الساكنة أو المتحركة) في مرجعه (أي في مرجع إحداثياته) أهو يقف ساكناً في حقل ثقالي أم أنه يتحرك حركة متسارعة في فضاءٍ خالٍ ، لذلك لا سبيل للتمييز بين السكون والتسارع ، ولا فرق في ذلك أكان الإنسان يرصد الأجسام المادية من الناحية التحريكية (الديناميكية) أم من الناحية الحركية أم يرصد انتشار الضوء ، وهذا ما أدى بأينشتاين إلى استنتاجٍ مهم جداً بشأن سلوك الضوء في الحقل الثقالي .

فحين تمر حزمة ضوئية ، عبر المصعد المتسارع ، في اتجاه عمودي على تسارعه ، تبدو أنها تسقط نحو أرض المصعد مثلما تسقط الجسيمات المادية ، لأن أرضه تتحرك حركة متسارعة . ولما كان مبدأ التكافؤ ينص على أنه لا فرق بين آثار التسارع وآثار الثقالة ، لذلك توقع أينشتاين أن تسقط الحزمة الضوئية في الحقل الثقالي ، كما تسقط الجسيمات المادية ؛ وقد ثبت هذا التوقع بحذافيره في أثناء الكسوف الشمسي الذي حدث عام 1919 ، فقد شوهد أن الحزمة الضوئية الآتية من نجم

بعيد تنعطف نحو الشمس حين تمر في جوارها، وكان مقدار انعطاف الضوء في سقوطه متفقاً مع ما توقعه أينشتاين.

وهكذا نستطيع أن نستنتج معظم ظواهر النسبية العامة من مبدأ التكافؤ بمجرد أن نلاحظ كيف تتجلى الحوادث في مرجع متسارع، إلا أن النظرة العميقة المتبصرة في قوانين الطبيعة وفي سلوك الكون وبنيته كما تعرضه النظرية لا يمكن أن نحصل عليها إلا باستخدام الشكلية الكاملة لهذه النظرية؛ لذلك دعونا نصف باختصار هذه السمات الشكلية التي تميز هذه النظرية العامة عن النظرية الخاصة ونظرية نيوتن قبل أن ندرس بقية النتائج المتعلقة بالظواهر الفيزيائية الناجمة عنها.

لنلاحظ أولاً أنه لا خلاف بين النظرية العامة والنظرية الخاصة في أنهما مبنيتان على زمكان رباعي الأبعاد (حيث المكان والزمان مندمجان) وفي أن الأولى تشمل الثانية ولكنها تختلف عنها في أن هندسة النسبية العامة لا إقليدية، وهذا الجانب اللا إقليدي فيها هو الذي يستجر أو يؤدي إلى نظرية أينشتاين في الثقالة. ولكي نرى كيف ترتبط الثقالة بالزمكان اللا إقليدي، دعونا نرجع إلى مصعد أينشتاين ومبدأ التكافؤ، ولنتصور الآن أن المصعد يسقط سقوطاً حراً نحو الأرض؛ ففي هذه الحال يسقط المراقب وكل شيء آخر في المصعد بسرعة واحدة، كما أن الشيء المقذوف يتحرك عبر المصعد حركة مستقيمة كما يراها المراقب، أي لا يوجد بالنسبة له عندئذ حقل ثقالي. أما بالنسبة إلى مراقب واقف على الأرض فلا تتحرك الأشياء المقذوفة في المصعد على خطوط مستقيمة وإنما على قطوع مكافئة، لذلك لا وجود لقوى ثقالية بالنسبة للمراقب الذي في المصعد ولكنها موجودة عند الآخر الواقف خارجه، فكيف يمكن التسليم إذاً بهاتين النظرتين المتناقضتين؟ لقد رأى أينشتاين أن حل هذه المفارقة يكمن في حذف مفهوم القوة الثقالية نهائياً لأنه مفهوم ليس له معنى مطلق ويتغير من مرجع إلى آخر؛ وهكذا أعاد أينشتاين صياغة قوانين نيوتن في الحركة لكي تتضمن هذه الفكرة الجديدة، وقد توصل إلى ذلك بأن أعاد تأويل قانون نيوتن الأول ليشمل الأجسام المتحركة في حقل ثقالي، وقرر بأن الأجسام تتحرك دائماً في خطوط مستقيمة سواءً أكانت في حقل ثقالي أم لا؛ ولكن هذا القول يتطلب إعادة تعريف مفهوم الخطوط المستقيمة لكي تشمل خطوطاً هي ليست مستقيمة بالمعنى الإقليدي؛ ولقد قام أينشتاين بذلك بأن بيَّن أن هندسة الزمكان هي التي تحدِّد نوع الخط أهو مستقيم أم لا، لذلك يتوقف كون الهندسة إقليدية أو لا إقليدية على وجود كتلة في الفضاء أو عدم وجودها، فإذا كان الفضاء خالياً من الكتل فإن هندسته إقليدية وإلا فإن وجود الكتل فيه يجعل هندسته لا إقليدية. أما مفهوم القوة الثقالية عند أينشتاين فقد استبدل به في حال وجود كتل، زمكاناً منحنياً (أي لا إقليدياً). وهكذا أصبحت الثقالة هندسة وأصبح السبب في حركة الأجسام بالطريقة التي نراها في الحقل الثقالي يعود إلى اتباع هذه الأجسام انحناء الزمكان في الموضع المجاور لها. ولكن حركتها هذه تعد في الهندسة اللا إقليدية حركة في خطوط مستقيمة لأنها

أقصر مسار في المضمون الخاص بهذه الهندسة.

وقد أتى قانون أينشتاين في الثقالة نتيجة مباشرة لهندسة الزمكان اللا إقليدي فكان تصحيحاً لقانون نيوتن بأن تنبأ ببعض التوقعات الهامة التي تحققت كلها، وكان مما توقعه انحناءُ حزمة الأشعة الضوئية عند مرورها بالقرب من الشمس كما ذكرنا سابقاً. كذلك بيَّن أن مدار الكوكب نفسه حول الشمس يدور في اتجاه حركة الكوكب، وقد سُميت هذه الظاهرة «مبادرة حضيض الكوكب» (أي أقرب نقطة في المسار إلى الشمس)، وقد شوهدت هذه المبادرة فعلاً؛ وأخيراً، فقد بيَّن أن الضوء القادم من سطح نجمٍ ما يميل إلى الأحمرار (الانزياح الاينشتايني نحو الأحمر) وهذا الأثر يتجلى أكثر ما يتجلى في حال النجوم الكثيفة الهائلة الكتلة مثل الأقزام البيضاء، لأن الحقل الثقالي على سطح هذه النجوم قوي جداً.

والحقيقة أنه يمكن أن تُستنتج من هندسة الزمكان اللا إقليدية، الناشئة عن وجود أجسام ذات كتل هائلة كالنجوم، كافةُ الآثار التي تتوقعها نظرية النسبية العامة؛ فالزمن مثلاً يتباطأ (أي «تُقصِّر» الميقاتية) بالقرب من نجوم كهذه، وهذا ما يفسر احمرار الضوء، لأن الذرات التي تُصدر الضوء هي أساساً ميقاتيات، فيتجلى تباطؤ دقاتها على صورة احمرار في الضوء الذي تصدره، كما أن القضبان التي تتخذ منحى شعاعياً في حقل النجم الثقالي (أي في اتجاه قطره) تتقلص، ولكنها تتقلص حين تتخذ منحى جانبياً، وتعبر هذه الظاهرة خير تعبير عن هندسة الفضاء اللا إقليدية، كما أنها هي التي تؤدي إلى مبادرة حضيض الكوكب.

أضف إلى ذلك، أنه لما كان تباطؤ الزمن وتقلص الأطوال في الحقل الثقالي يؤثر في شعاع السرعة، لذلك تتناقص سرعة الضوء في الحقل الثقالي، وهذا يعني أن سير الضوء بالقرب من نجم ضخمٍ يكون أبطأ من سيره حين يكون بعيداً عنه. والسبب الرئيسي هو أن جاذبية الثقالة للضوءِ تُبطىء من انتشاره؛ فإذا كانت الثقالة قوية لدرجة كافية، أصبح الضوء عندئذ غير قادر على الحركة شعاعياً (على منحى خط القوة) ولكنه يستطيع أن يتحرك جانبياً فقط. وأكثر ما يتجلى ذلك على سطح نجم متراص وكثيف جداً، فإذا كانت كثافته وتراصه كافيين، فإن الضوء لا يمكن عندئذ أن يفلت منه إطلاقاً؛ ويدعى نجم كهذا ثقباً أسود، وهو بمعنى ما يحني الضوء حول نفسه فلا يدع أي شيء يفلت منه. وتتوقع نظرية أينشتاين الثقالية أيضاً أن تصدر الكتل المهتزة أمواجاً ثقالية تشبه الأمواج الكهرطيسية الصادرة عن الشحنات الكهربائية المهتزة. ومع أن أحداً لم يكتشف بعد هذه الأمواج الثقالية مباشرة، فإن هناك دليلاً غير مباشر على إصدارها، وهو ما تم الحصول عليه من دراسة تحريكيات (ديناميكيات) نجم شوهد يدور حول ما بدا أنه ثقب أسود.

على أن أعظم إنجاز باهر حققته نظرية النسبية العامة، كان في مجال علم نشوء الكون (الكوسمولوجية)، وهو موضوع كان من الممكن معالجته بصورة هامشية فحسب باستخدام نظرية

نيوتن الثقالية. وفي عام 1916، طبق أينشتاين نظريته الثقالية على الكون بجمله، وتوصل من ذلك إلى نموذج سكوني للكون (لا يتوسع ولا ينهار على ذاته) ثم أثبت باحثون آخرون بعد أينشتاين أن نظريته تؤدي إلى نموذج كون لا سكوني ومن بين ما تؤدي إليه نموذجُ كون يتوسع. وتتوقع هذه النماذج التوسعية هروب المجرات البعيدة عنا بصورة تتفق مع الأرصاد الفلكية. وهكذا ساهمت نظرية النسبية العامة مساهمة عظيمة في إغناء علم نشوء الكون الذي تسير فيه الأعمال الرصدية والنظرية بخطى حثيثة.

النظرية الذرية
ذرة بور

«ما من مرحلةٍ أنجزها العالم في تقدمه إلا وحققها درجة درجة وخطوة خطوة».

ــ وندل فيلبْس*

عندما اكتشف الفيزيائيون أن الإلكترونات السالبة الشحنة والبروتونات الموجبة الشحنة هي المكونات الأساسية للمادة، بدأوا ببناء نماذج للذرات مهتدين بأن الدلائل التجريبية بيّنت أن المادة الحيادية (اللا مشحونة) تحوي العدد نفسه من الإلكترونات والبروتونات، فكان واضحاً أن أبسط الذرات هي التي تتألف من بروتون واحد وإلكترون واحد، لذلك كان بناء نموذج لهذه الذرة، أي ذرة الهدروجين، هو أول خطوة في تطوير نظرية ذرية مفيدة، لأنه حين تُفهم بنية ذرة الهدروجين وتحريكها (ديناميتها) يتيسر إدراك الأمور الأخرى كلها. وقد بدت هذه المهمة في بادئ الأمر سهلة إلى حدٍ ما، لأن الإلكترون والبروتون يجذب كل منهما الآخر بقوة مماثلة لقوة الجذبُ الثقالية بين جسمين، والفرق بين الظاهرتين أن الجذب الثقالي يتعلق بكتل الأجسام المتبادلة التأثير (الشمس وكوكبٍ ما مثلاً)، في حين يتوقف الجذب الكهراكدي بين البروتون والإلكترون على شحنة الإلكترون السالبة وشحنة البروتون الموجبة. وكان ميلّيكان قد تحقق بالقياس من تساوي مقداريْ هاتين الشحنتين المتعاكستين، فأصبح من الممكن أن يُحسب على الفور مقدار جذب البروتون الكهراكدي للإلكترون، إضافة إلى إمكان استخدام الطرائق الرياضية، التي طُورت منذ أيام نيوتن لمعالجة مسألة التجاذب الثقالي بين جسمين (الشمس وكوكبٍ ما)، في مسألة الذرة (البروتون والإلكترون)، ونستطيع عندئذ إهمال الجذب الثقالي بين الإلكترون والبروتون لأن كتلة كلٍ من هذين الجسيمين صغيرة لدرجة أن تجاذبهما الثقالي أصغر من تجاذبهما الكهراكدي بمقدار 10^{39}

* Wendell Phillips (1811-1884) مصلح اجتماعي أمريكي وخطيب مفوّه تفرغ للكفاح من أجل الحريات المدنية وإبطال الرق وحق الزنوج في الأرض والتعلم.

مرة، أي 1 وعلى يمينه 39 صفراً (إذ إن كتلة البروتون هي جزء من تريليون التريليون من الغرام (10^{-24} غ)، وكتلة الإلكترون أصغر منها بمقدار 1840 مرة تقريباً). وهكذا بدت مسألة الذرة سهلة جداً، إذ يطبق حل مسألة التجاذب الثقالي بين جسمين في الفيزياء التقليدية على ذرة الهدروجين بعد استبدال الشحنات الكهربائية بالكتل في صيغة القوة.

وقد بدت خطة التصدي هذه معقولة جذابة لولا أن عدداً من العوائق وقفت في طريق تطبيقها؛ ففي حين أن الدليلَ على صحة الحل في حالة الجذب الثقالي يُرى مباشرة في مدارات الكواكب، لكن المدارات الإلكترونية لا يمكن رؤيتها في الذرة، لذلك يجب أن يستدل عليها استدلالاً غير مباشر من دلائل أخرى، وقد توافر، لحسن الحظ، دليل كهذا هو الإشعاع الصادر عن الذرات عندما تُثار بطريقةٍ ما، وهذا الإشعاع هو ما نسميه «الطيف» الضوئي للذرة.

ثم إنه لا أحد كان يعلم في السنوات الأولى من القرن العشرين كيف يتحرك الإلكترون والبروتون، أو كيف يكون وضع أحدهما بالنسبة إلى الآخر في ذرة الهدروجين، أو كيف يكون هذا الوضع بالأحرى في حالة الإلكترونات وبروتونات الذرات الأثقل. أما تشبيه الذرات بمنظومات شمسية (كوكبية) مصغّرة، أو معاملتها على هذا النحو، فهي فكرة مغْرية فعلاً لما فيها من دلالة على وحدة التصميم في الطبيعة من العالم الواسع إلى العالَم الصغير جداً؛ إلا أن هذا التماثل والبساطة الظاهريين كانا خداعيْن، لأن سلوك الجسيمات المشحونة يختلف كل الاختلاف عن سلوك الكتل، فحين يدور كوكب كالأرض حول الشمس فإنه لا يفقد شيئاً من طاقته وفقاً لقانون نيوتن في الثقالة، في حين تطلق الشحنة طاقة باستمرار عند دورانها بحسب قوانين الكهرباء والمغنطيسية، مما يعني أن الإلكترونات، مهما يكن تسارعها في الذرات، لا يمكن أن تحافظ على مداراتها، وإلا لكانت مبادئ الكهرطيسية غير قابلة للتطبيق على الإلكترونات. ولكن لم يكن الفيزيائيون يعرفون في تلك الأيام كيف يغيرون قوانين الكهرطيسية لكي تحافظ الإلكترونات على مدارات مستقرة، بل لم يكونوا يريدون تغيير هذه القوانين لأنها كانت على اتفاق رائع مع جميع الظواهر الكهرطيسية المرصودة؛ لذلك بدأ نموذج الذرة الكوكبي يفقد مكانته إلى أن فرضته على اهتمام الفيزيائيين سلسلة هامة من التجارب.

فقد نظم اللورد رذرفورد، الذي أصبح منذ عام 1910 مديراً لمختبرات الفيزياء في منشستر، سلسلة من التجارب أثبتت بصورة حاسمة أن البروتونات متجمعة في الذرة في نواة مركزية ضئيلة وكثيفة، وأن الإلكترونات تدور حول هذه النواة وفق نموذج من التحريك (الديناميك) لم يكن مفهوماً، فبات الفيزيائيون مرغمين على النظر جدّياً إلى نموذج الذرة الكوكبي مع أنهم لم يكونوا يعرفون كيف يتلافون أمر الاعتراض الجدي الذي تثيره مبادئ كهرطيسية مكسويل؛ وقد ظلوا على هذه الحال إلى أن أزاح الفيزيائي الدانماركي نيلز بور عام 1913 هذا العائق الكهرطيسي في وجه

النموذج الكوكبي بأن أدخل نظرية الكم في النموذج الذري بطريقة جديدة جداً ورائعة، وإن لم يمنع ذلك من اعتراض عدد كبير من الفيزيائيين. وكان بور قد وجه اهتمامه أولاً إلى أبسط الذرات (أي ذرة الهدروجين) بدلاً من الذرات المعقدة، فرأى أن بناء نموذج مستقر لذرة الهدروجين يبقى فيه الإلكترون في مدار مستقر حول النواة يستدعي أن يبقى هذا المدار على مسافة معينة من البروتون، ولكن هذه المسافة لا يمكن تعيينها بكتلة الإلكترون وشحنته وحدهما بل لا بد من إدخال كمية أخرى مع الشحنة والكتلة يمكن أن تتعين معها المسافة. وقد وجد بور أن هذه المشكلة تُحل بثابت الفعل h (ثابت بلانك) الذي كان لا بد من إدخاله في النظرية الذرية بطريقة تجعل الإلكترون يدور حول البروتون في مدار مستقر، كما رأى بور أن تحقيق ذلك ممكن فيما لو استكمّ فعلُ الإلكترون في الذرة على النحو الذي يجعله غير قادر على الحركة في مدار اختياري وإنما في مداراتٍ معينة فحسب هي المدارات التي ترتبط بعددٍ صحيح من وحدات الفعل. وقد تخيل بور هذه المدارات على صورة دوائر متمركزة ومتعاقبة على مسافات (أي أنصاف أقطار) متزايدة تتعين ضمن شروط الاستكمام التالية: 1) يمثل أقرب مدار إلى البروتون وحدة فعل واحدة إذا كان الإلكترون موجوداً فيه، 2) يمثل المدار الثاني وحدتيْ فعل (تُكتب 2h)، وهكذا دواليك. وتُعطى هذه المدارات على التوالي الأرقام 3, 2, 1، وهكذا؛ وتسمى هذه الأعداد «أعداد الكم الرئيسية»، وتتزايد طاقة الإلكترون من مدار إلى الذي يليه بطريقة معينة عندما يقفز الإلكترون من مدار أدنى (قريب من البروتون) إلى مدار أعلى. ولما كان أدنى مدار (وهو المدار 1) يمثّل وحدة فعل واحدة، ولا يوجد فعل أصغر من 1 بحسب استكمام الفعل فلا يمكن للإلكترون إذاً أن يجد مداراً أقرب إلى البروتون، وعلى هذا النحو أصبح استقرار الذرة مضموناً.

وحين يكون الإلكترون في أدنى مدار (أي ما يدعى «مدار بور») تكون طاقته في حدها الأدنى المباح فلا يمكنه بالتالي أن يصدر طاقة، ولذلك تُبطل نظريةُ الكم النظريةَ الكهرطيسية إذ تتيح للإلكترون أن يدور حول البروتون من دون أن يشع طاقته مع أنه يتسارع. ولكن يستطيع الإلكترون بامتصاص الطاقة، أي امتصاص فوتون في كل مرة، أن يقفز إلى مدارٍ أعلى؛ أي أن امتصاصاً كهذا للفوتون يؤدي إلى انتقال الإلكترون إلى مدار أعلى مخصَّص له ولا يشع فيه أي طاقة، ومن ثَم فهو لا يخضع لقوانين مكسويل الكهرطيسية طيلة بقائه في أحد هذه المدارات المنفصلة، ولكنه يشع فوتوناً واحداً حين يهبط من مدارٍ أعلى إلى مدارٍ أدنى. وكلما كبرت القفزة اقترب لون الفوتون الصادر من اللون الأزرق.

كانت فكرة بور هذه، أي فكرة ذرةٍ لها مدارات منفصلة تدور فيها الإلكترونات من دون أن تشع طاقة (وفق ما تقتضيه نظرية مكسويل الكهرطيسية) غريبة لدرجة أن معاصريه الأكبر منه سناً استقبلوها إما بالريبة الشديدة وإما بالرفض التام؛ ومع ذلك لم تعدم بعضَ المؤيدين المتحمسين الذين

رأوا فيها الإنقاذ الوحيد للفيزياء الذرية على الرغم مما أثارته من أسئلة عديدة بلا جواب بالإضافة إلى أسئلة جديدة محيّرة طرحتها هي نفسها . ولكن على الرغم من سماتها المثيرة للاعتراض كان لا بد من قبول نموذج الذرة هذا لأنه كان يفسر إحدى المشاهدات التجريبية الهامة جداً والتي لم يستطع أي نموذج آخر أن يبادر إلى تفسيرها ، وهي طيف ذرة الهدورجين المرصود . ذلك أن الذرات حين تُثار بطريقةٍ ما ، كأن تصطدم إحداها بالأخرى ، تشع طاقة كهرطيسية تتألف من خليط من مختلف أطوال الموجات (ألوان) تدعى « طيفاً » ، ولكن هذا لا يعني أن طيف الذرة النموذجي يحوي كل هذه الألوان الممكنة بل يتألف من عددٍ من الخطوط الملونة المنفصلة التي تميّز ذلك العنصر بالذات دون غيره .

وكانت معضلة فهم ذرة الهدروجين قد بدأت عام 1885 حين لاحظ ج . بالمر J.Balmer ، وهو معلم علوم شاب في مدرسة سويسرية للبنات ، أربعة خطوط جلية في طيف الامتصاص للشمس سرعان ما تأكد أنها خاصة بطيف ذرة الهدروجين ، حتى أنها أصبحت تعرف عالمياً باسم « خطوط بالمر للهدروجين ».وقد أثبت بالمر تجريبياً أنه يمكن التعبير عن تواترات ألوان هذه الخطوط بدلالة الأعداد الصحيحة 2 ,3 ,4 ,5 ،... بوساطة صيغة بسيطة جداً ، ولكن ظلت هذه الصيغة الغامضة المذهلة بلا تفسير إلى أن استنتجها بور من نموذج ذرته الكمومي (مدارات الإلكترون المنفصلة) ، فاتضحت عندئذ كافة الأمور ، إذ ظهر الاتفاق التام بين المدارات المنفصلة التي حددها بور لذرة الهدروجين والخطوط اللامعة المنفصلة في طيفه .

وربما كان نيلز بور أعظم الفيزيائيين تأثيراً في القرن العشرين ، فيما عدا أينشتاين ، لأن مبدأه ، الذي أصبح يُعرف باسم « تتامية Complementarity بور في ميكانيك الكم » والذي استبدله بسببية الفيزياء التقليدية (لاعتماده على الاحتمالات الإحصائية) ، يؤلف مع نظرية أينشتاين النسبوية إحدى دعامتيْ الفيزياء الحديثة . ولكن تصور بور للطبيعة القائم على نموذج حوادث تحدث اعتماداً على المصادفة كان يتعارض مع النموذج الحتمي الذي قدمه أينشتاين ، الأمر الذي حمل عملاقي الفيزياء الحديثة هذين على عدم الاتفاق ــ على الرغم من صداقتهما ــ بشأن عقلانية الطبيعة والسمات الذاتية الأصيلة في الفيزياء الحديثة .

ولد ن . هـ . د . بور Niels Henrik David Bohr في كوبنهاغن عام 1885 لأب كان يعمل أستاذاً للفيزيولوجية في جامعة هذه المدينة ، ولكن هذا الأب لم يكن يرضى لنفسه أن ينغمس في ميدان اختصاصه فحسب ، لذلك كان منزله مفتوحاً دائماً لمواكب الزوار الذين كان الكثير منهم زملاءه في التعليم وكانوا مختصين في موضوعات شتى من الفلسفة حتى الفيزياء . وكان نيلز ، على الرغم من صغر سنه ، يصغي باهتمام لمناقشاتهم الحامية والطويلة غالباً ، فكان يدفعه حديثهم الجدلي إلى التأمل في آرائه الخاصة الغامضة بشأن شتى المواضيع ، من اللاهوت والعلم حتى السياسة



نيلز هنريك ديفيد بور (1885-1962)

والاقتصاد، ولم يتعلم من هذه الأحاديث المسائية أشياء كثيرة عن العلم فحسب، بل سمع أشياء كثيرة جعلته يعجب لماذا كان العالَم الفيزيائي كما كان عليه حين كان ماكس بلانك يعلن نظرية الكم وكان كوري وزوجته وإرنست رذرفورد قد استكملوا تحرياتهم في النشاط الإشعاعي.

أمضى نيلز بور طفولته السعيدة مع أخيه هارالْد الذي أصبح فيما بعد رياضياً لامعاً، فكانا يقضيان كثيراً من أوقاتهما الحرة في التزلج وركوب الدراجة ولعب كرة القدم، على أن متعتهما في اللعب لم تمنع أياً منهما عن الالتفات جدياً إلى دراسته وتنمية اهتمامه العميق بالعلم والرياضيات. ثم طوّر نيلز، عند انتسابه للجامعة عام 1903، وسائله الفكرية الأساسية التي مكنته من اقتراح نموذج للعالم دون الذري يعادل في ثوريته عمل بلانك وأينشتاين. وقد أظهر بور منذ البداية نضجاً ملحوظاً في ميدانه العلمي، إذ إن مشروع بحثه الأول الذي كان يهدف إلى قياس التوتر السطحي للماء كان

مدروساً بعناية وشمول دفع أكاديمية العلوم في الدانمارك إلى منحه المدالية الذهبية لعام 1906 وهو ما يزال طالباً لم يتخرج بعد.

وكانت طريقة بور في بحثه تقوم، حتى وهو في بداية دراساته، على النظر إلى المسألة من مختلف جوانبها والتأمل ملياً مدة أشهر أو حتى سنوات في أوجه عدم الاتساق فيها ليقوم بما يلزم من تصحيح أو صقل لما يراه نابياً إلى أن يصل إلى ما يعتقد أنه الإجابة المُرْضية، في حين كان فكر أينشتاين السامي يمنحه تلك الرؤية الحدسية في الفيزياء التي مهدت السبيل إلى وميض الإلهام الذي قاده إلى نظرية النسبية، فكانت طريقة بور أكثر منهجية، إذ بنى وجهة نظره عن العالَم مبتدئاً كما يبدأ البناء بوضع لبناته على الأرض لبناء حائط المنزل، وهذا سر قوته، فهو يكمن في تصميمه على متابعة التأمل في مسألة معينة من مسائل الفيزياء لكي يرى عسى أن يكون هناك حل إضافي، حتى بعد زمن طويل من توصله إلى ما قد يرى فيه معظم زملائه أنه حل مُرْضٍ.

رحل بور بعد أن أنهى أطروحة الدكتوراه عام 1911 إلى جامعة كمبردج آملاً القيام ببحث ذري في مختبر كافندش مع ج. ج. تومسون، ولكن «تومسون، لسوء الحظ، كان قد فقد اهتمامه بهذا الموضوع فأخفق في تقدير أهمية أطروحة بور التي قدمها بور له مترجمة إلى الإنكليزية ترجمةً بذل جهداً كبيراً لإنجازها، وقد رفضت جمعية كمبردج الفلسفية هذه الأطروحة لكونها طويلة ومكلفة الطبع، كما أخفقت محاولات بور فيما بعد لنشرها»[1]. فراح بور يبحث بعد خيبة أمله عن مدير جديد يشرف على بحوثه يمكن أن يكون متعاطفاً مع اهتمامه بالنظرية الذرية، فوجد ضالته في شخص إرنست رذرفورد الذي كان قد اقترح في عام 1910 نموذج ذرته المؤلف من نواة موجبة الشحنة، فالتحق بور حالاً برذرفورد في مختبره في منشستر، وفي غضون ثلاثة أشهر من عام 1912 عامرة بالنشاط وضع أسس ما أصبح يُعرف «بنظرية بور في تركيب الذرة»، فساعد هذا العمل على إزالة عددٍ من المفارقات التي كانت قد برزت في جدول مندلييف الدوري، لأنه قَبِل «وجود نوى ذرية لها الشحنة نفسها ولكن كتلتها مختلفة بحيث أصبح من الممكن أن يوجد أكثر من نوع واحد من الذرة نفسها يشغل المكان نفسه في الجدول الدوري»[2]. وقد نُحِتت فيما بعد كلمة isotope* (نظير) للدلالة على المواد التي تشترك بخواص كيمياوية واحدة على الرغم من اختلاف أوزانها الذرية، غير أن اكتشاف بور لم يلق في ذلك الوقت سوى قليل من الاهتمام، حتى أن مرشده رذرفورد حاول بدافعٍ من طبيعته المحافِظة أن يُثني بور عن نشر نتائجه، ولكن برودة حماسته لم تمنع بور من العمل قُدماً في تطوير نموذجه الذري الذي يفسر استقرار مدارات الإلكترونات حول النواة، إذ إن الحس الفطري كان يوحي بأن نواة الذرة العظيمة الكتلة نسبياً يجب أن تجذب إليها

---

* من iso بمعنى متساوي والكلمة اليونانية topos التي تعني موضع أو مكان، وقد ترجم هذا المصطلح إلى العربية بكلمة نظير وهو الشائع أو متماكن.

الإلكترونات الخفيفة تدريجياً إلى أن تنهار الذرة. ولذلك تساءل بور: لماذا لا تحدث هذه الظاهرة؟ فكان بحثُه عن تفسيرٍ لاستقرار ذرة الهدروجين، التي هي أقل الذرات تعقيداً (لأن لها إلكتروناً واحداً يدور حول النواة) هو الذي قاده لأنه يرى في كم الفعل عند بلانك حلاً ممكناً لهذه المسألة.

وكان نجاح نظرية الكم في الميدان الذري باعثاً على أن يبدأ الفيزيائيون بتطبيق نموذج ذرة بور على الذرات المعقدة فكان نجاحهم في ذلك محدوداً، ولكن سرعان ما تبين أن في نموذج بور عدداً من العيوب الطفيفة على الرغم من أساسه الصحيح فاستمر التسابق على تحسينه من عام 1913 إلى عام 1927 من دون مساسٍ بصورته الثورية المتمثلة في مداراته المنفصلة. وكانت بعض هذه التحسينات توحي نفسها بنفسها، فاستخدام نموذج بور للمدارات الإلكترونية الدائرية كان أضيق من أن يفسح المجال لأن يرقى هذا النموذج إلى كامل قدرته، لذلك كانت أولى خطوات تطويره هي إدخال المدارات الإلكترونية اللادائرية، فكان هذا التعبير أشبه بالتحسين الذي أدخله كبلر على نظام كوبرنيق الشمسي، حين استبدل بالمدارات الدائرية مدارات إهليلجية (بشكل قطع ناقص)، إذ استُبدلت هنا أيضاً بمدارات بور الدائرية مداراتٌ ناقصية. ففي حين كان نموذج ذرة بور الأصلي يتعامل مع أحجام مدارات الإلكترون التي تتعين بأنصاف أقطارها فحسب، أصبح النموذج المحسَّن يتعامل مع أشكال المدارات إضافة إلى أحجامها، فتطلب هذا التعقيد إدخال عددٍ كمومي ثانٍ سُمي «العدد الكمومي السمتي» الذي هو أيضاً عدد صحيح، فارتبط وضع الإلكترون في الذرة بعددَيْن صحيحين ـــ العدد الكمومي الرئيسي والعدد الكمومي السمتي أو المداري ـــ وأصبح العدد الكمومي السمتي هو العدد الكمومي الخاص باندفاع الإلكترون الزاوي (أي حركته الدورانية) مثلما كان العدد الكمومي الرئيسي هو العدد الخاص بطاقته. وهكذا ارتبطت هندسة مدار الإلكترون ارتباطاً متميزاً بخواص هذا الأخير التحريكية عن طريق مجموعتين من الأعداد الصحيحة.

ولكن هذا التغيير لم يضع حداً لتطوير نظرية بور، فهي مع اعتمادها على مجموعتين من الأعداد الكمومية لم تكن قادرة على تفسير سلوك الذرة في الحقول المغنطيسية لأن الإلكترونات تتصرف نتيجةً لدورانها حول النواة تصرف مغنطيس دوار، فهي لذلك تتأثر بالحقل المغنطيسي تأثراً محدوداً لم تستطع الفيزياء التقليدية تفسيره، لذلك كان لا بد من تدخل نظرية الكم فأُدخل عدد كمومي ثالث هو «العدد الكمومي المغنطيسي» الذي وفَّق بين نموذج بور وخواص الذرة التي تتجلى في الحقل المغنطيسي على صورة تغيراتٍ في طيف الذرة. فحين لا تكون الذرة في حقل مغنطيسي يكون عددا الإلكترون الكموميان الرئيسي والسمتي كافيين لفهم الخطوط المضيئة في طيف الذرة، ولكن حين تكون الذرة في حقل مغنطيسي يظهر مزيد من الخطوط في طيفها، وهذه الظاهرة هي ما يعرف «بمفعول زيمان» الذي تستطيع النظرية الكهرطيسية التقليدية تفسيره جزئياً فحسب، في حين تفسره نظرية الكم تفسيراً كاملاً بإدخال عددٍ كمومي ثالث. ونحن نستطيع إدراك حاجتنا لهذا العدد الكمومي الثالث بملاحظة أن الذرة تتصرف كالمغنطيس الدوار، فهي لذلك تبادر في

دورانها حول الحقل المغنطيسي مثلما يبادر الخذروف في دورانه حول الحقل الثقالي حين يوضع على سطح أفقي، فهذه المبادرة هي إذاً خاصة تحريكية لا بد من استكمامها ويسمى هذا الإجراء «الاستكمام المكاني» لأنه يحدُّ من توجيه محور دوران الذرة بالنسبة إلى الحقل المغنطيسي بعددٍ متميِّز.

وهكذا خُص الإلكترون بالأعداد الكمومية الثلاثة السابقة الذكر التي تحدِّد خواصه التحريكية داخل الذرة، وكان ذلك قد تم تبعاً للقواعد المحددة التي اكتشفها الفيزيائيون في مختبراتهم في العقد الذي انقضى بين عرض بور لنموذج ذرة الهدروجين الكمومي واكتشاف ميكانيك الكم. ومع أن الكثير مما أتى من النظرية الذرية بعد عمل بونر الأولي كان خليطاً من نظرية نيوتن التقليدية ونظرية الكم، أضيفت إليه بحسب الحاجة قواعد جديدة، فإنها كانت تؤدي الغرض منها على أحسن وجه، ولكن ظلت هناك بعض المعطيات التجريبية التي لم تستطع النظرية تفسيرها، من ذلك مثلاً أن عدد خطوط طيف الذرة كما تتنبأ به النظرية (حتى مع إدخال الأعداد الكمومية الثلاثة في النظرية) كان لا يتجاوز نصف العدد المشاهد فعلياً؛ وقد أُزيل هذا العيب في النظرية بإدخال عدد كمومي رابع يرتبط بسبين Spin الإلكترون أو لفِّه (دورانه على نفسه).

ونحن جميعاً نعرف معنى دوران الأجسام حول نفسها كدوران الأرض ودوران المحركات والجيروسكوبات الصغيرة التي أصبحت مهمة جداً في التقانة الحديثة. أما دوران الإلكترون حول نفسه فيصعب تخيله، لذلك لم يُدرج ضمن خواص الإلكترون الفيزيائية في نظرية بور، إلا أن الفيزيائيين الألمانيين الشابين ص. غودشميت S.Goudsmit و ج. إهْلنْبك G.Uhlenbeck أثبتا في عام 1925 أن الصعوبات التي تلاقيها نظرية بور مع خطوط الطيف تزول فيما لو فُرض أن للإلكترون سبيناً، وهذا يعني وجود عدد كمومي رابع للإلكترون هو «العدد الكمومي السبيني»، إلا أن هذا العدد يختلف عن الأعداد الكمومية الثلاثة الأخرى في أن له قيمتين فحسب، ذلك لأن محور سبين الإلكترون يمكن أن يكون له في مجال مغنطيسي اتجاهان فحسب، أحدهما يوازي اتجاه هذا الحقل والآخر يوازيه ويعاكسه.

ولكن الفيزيائي النظري و. باوْلي W.Pauli، كان قد اقترح، حتى قبل أن يكتشف غودشميت وإهلنبك سبين الإلكترون، وجود عدد كمومي رابع للإلكترون لا صلة له بالسبين؛ إذ وجد أن هذا العدد الرابع في حال وجود إلكترونين أو أكثر في الذرة، كان ضرورياً لتفسير طريقة توزع الإلكترونات على المدارات المتتابعة، التي تُفضي إلى المكافىء الكيمياوي؛ وقد أسهم باولي إسهاماً كبيراً في نموذج ذرة بور بوضعه مبدأ الانتفاء Exclusion الذي يحمل اسمه والذي ينص على أن الإلكترونات يجب أن توزع نفسها داخل الذرة (أي على مختلف المدارات) بطريقة ينتفي معها وجود إلكترونين اثنين لهما مجموعة واحدة من الأعداد الكمومية. وقد أمكن بهذا المبدأ البسيط

تفسير جدول العناصر الكيمياوي الدوري فكان ذلك ذروة ما بلغه نموذج بور من تطور ، ولكنه لم يذهب إلى أبعد من ذلك ، فكان لا بد من إجراء بعض التغيير ، وهذا ما حدث عند اكتشاف ميكانيك الكم الذي لا بد قبل دراسته من إلقاء نظرة على آخر مساهمة قام بها أينشتاين في نظرية الإشعاع ، فهي تظهر بوضوح دور الفوتون في نموذج ذرة بور وتكشف خاصة تحريكية هامة في الفوتون تجعل الانتقال من نظرية الكم إلى ميكانيك الكم أمراً لا مفر منه .

ومع أن أينشتاين وافق كل الموافقة على صيغة إشعاع الجسم الأسود التي وضعها بلانك ، فقد كان يعتقد أنها بحاجة إلى مزيد من التعميم بسبب افتراض بلانك أن جدران الفرن الداخلية ، التي هي في حالة توازن مع الإشعاع الصادر منها ، تتألف من هزازات ، فكان يرى أن هذا الفرض خاص لا مبرر له ولا سيما بعد أن أثبت صحة ذلك في بحثه المنشور عن الإشعاع عام 1917 بأن توصل إلى صيغة بلانك نفسها باستخدام نموذج ذرة بور ، إذ تخيل وجود ذرة مغمورة في جو إشعاع جسم أسود (أو إشعاع حراري) وأنها تُصدر فوتونات ذات تواتر معين أو تمتصها ، وعلى هذا فإن الإلكترون يقفز باستمرار داخل الذرة من أحد مدارات بور الدنيا إلى مدارٍ أعلى ثم يعود ثانية وذلك حين يمتص فوتوناً ذا تواتر معين ثم يطلقه . فإذا وُجدت ذرات كثيرة كهذه فإنها تصبح عندئذ متوازنة مع الإشعاع بمعنى أنه يكون هناك في كل لحظة عددٌ من الذرات تكون إلكتروناتها في المدارات (أو الحالات) الدنيا وعددٌ آخر من الذرات تكون إلكتروناتها في المدارات (أو الحالات) العليا ، أي أن هذه الأعداد هي دائماً نفسها ، ويرتبط أحدها بالآخر بطريقة تحددها درجة حرارة الإشعاع ، بمعنى أنها تظل على حالها طالما ظلت درجة الحرارة ثابتة دونما تغيير .

وقد اضطر أينشتاين ، في سبيل الحصول على صيغة بلانك ، إلى توسيع تصور بور عن كيفية خسران الذرة المثارة لطاقتها (حين يكون إلكترونها في مدارٍ عالٍ) إذ يسقط هذا الإلكترون إلى مدار أدنى ، ويحدث هذا السقوط تلقائياً ، كما يقول بور ، بأن يقفز الإلكترون ، دونما أي حافز ، من مدارٍ عالٍ إلى مدارٍ أدنى مطلقاً الفوتون ذا التواتر المناسب . ولكن أينشتاين ، مع تسليمه بهذه الصورة ، أضاف إلى ذلك عملية إصدارٍ أخرى دعاها «إصدار الفوتونات المحفوز» (الإشعاع) ، وكانت حجته أن للفوتون ، بالإضافة إلى طاقته ، اندفاعاً مثل كل الجسيمات المادية الأخرى فإذا مر أحد الفوتونات ، التي لها تواتر مناسب ، بالذرة المثارة فإنه يحفز عندئذ الإلكترون الموجود في المدار العلوي على إصدار فوتون مساوٍ له ويتحرك بموازاته ، أي باندفاعٍ مساوٍ لاندفاع الفوتون الأصلي ، فيصبح هناك عندئذ فوتونان متماثلان يتحركان معاً حركةً واحدة ، ثم سرعان ما ينضاف إليهما فوتونان آخران ثم يصبح الأربعة ثمانية وهكذا دواليك إلى أن تتكون في غضون جزءٍ ضئيل من الثانية حزمة شديدة من الفوتونات المتماثلة التي تتحرك كلها معاً في اتجاه واحد تماماً .

واليوم ، أصبح أمراً عادياً استخدام حزمٍ كهذه في جميع مجالات التقانة الحالية الشائعة ،

وتولّد بوسائل تدعى ليزرات (الليزر مصطلح مركب من أوائل حروف العبارة الإنكليزية (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) . ولكن لم يكن في ذهن أينشتاين فكرة الليزر أو غيره حين أدخل مفهوم الإصدار الإشعاعي المحفوز لكي يستنتج منه صيغة بلانك في الإشعاع بل كان معنياً فحسب بحل مسألة مهمة في نظرية الإشعاع بغض النظر إطلاقاً عن أي نوع من التقانة الضوئية . والمهم هنا هو أن اكتشافيه النظريين البحتين ــ معادلته الشهيرة $E = mc^2$ ، والإصدار الإشعاعي المحفوز ــ أفضيا إلى صناعتين هما من أهم تقنيات العصر وهما الطاقة النووية والليزر .

وترجع أهمية آخر بحوث أينشتاين في الإشعاع لسببين ، فقد أسدى دعماً قوياً لنموذج ذرة بور ، وأدخل أيضاً فكرة اندفاع الفوتون المهمة في الفيزياء التي عزز بها طبيعته الجسيمية ، كما قادت هذه الفكرة أيضاً ف . هايزنبرغ فيما بعد إلى وضع مبدئه في الارتياب من وجهة نظر فيزيائية .

وقد ترك التفسير الذي فسّر به بور استقرار باطن الذرة أثراً هائلاً في دراسة الفيزياء الذرية ، ففي تبنّيه فكرة بلانك عن كم الفعل لتفسير استقرار الذرة ببساطة ورشاقة بالغتين ؛ ثم إنه استند إلى أحد الأركان الأساسية التي تقوم عليها الفيزياء الحديثة ، ألا وهو كم الفعل ، فبشّر بذلك بواحد من أهم التغيرات الثورية التي حدثت في الطريقة التي ينظر بها العلماء إلى تكوين الذرة . وقد نشر بور نتائجه تلك في عام 1913 في مجلة التقارير الفلسفية التي تصدر عن الجمعية الملكية وقدم نظريته مبيّناً أنها تستند إلى مسلّمتين « تنص المسلمة الأولى على أن لنظام الذرة حالات استقرارية وأنه يمكن وصف سلوك هذا النظام بلغة الميكانيك التقليدي ، وتنص الثانية على أن انتقال هذا النظام من حالة استقرارية إلى أخرى يتم بطريقة غير تقليدية يترافق معها إصدار كم واحد من إشعاع متجانس يرتبط تواتره بطاقته بمعادلة بلانك »[3] . وقد قُبلت نتائج بور هذه تدريجياً ، ولكن بور نفسه كان يعرف أيضاً أن المشكلة بحاجة إلى تحليل أكثر للعلاقة بين « جانبي الظواهر الذرية ، التقليدي والكمومي ، اللذين تتضمناهما مسلمتاه »[3] . وفي عام 1916 ، عاد بور من منشستر إلى كوبنهاغن ليتسلم هناك منصب أستاذ أُحدث لأجله في الجامعة ، ثم أصبح بعد أربع سنوات مديراً لمعهد الفيزياء النظرية الذي موّلته فئة خاصة من الأفراد المهتمين بالحفاظ على أبرز عالم دانماركي كي لا يعود إلى إنكلترا للقيام ببحوث ذرية ، فاجتذب هذا المعهد إليه كثيراً من فيزيائيي العالَم الرواد وساعد في إقامة علاقات علمية وتنميتها أسفرت عن مجموعة متنوعة من الاكتشافات المهمة في الفيزياء النووية .

وفي عام 1922 مُنح بور جائزة نوبل في الفيزياء ، أي بعد عام من تسلّم أينشتاين لهذه الجائزة من مؤسسة نوبل ، فأعقب تسلمه هذه الجائزة سيل عارم من درجات التكريم والمداليات ، ولكن جائزة نوبل جعلت اسمه مألوفاً لدى أناس كثيرين في أوربا وأمريكا ، فدفعته هذه الشعبية الضخمة إلى إلقاء محاضرات أكاديمية وجماهيرية عبْر القارة كلها ، كما ساقته جولات محاضراته إلى الولايات

المتحدة حيث أمضى معظم أيامه بالقرب من برنستون **Princeton** وأقام علاقات صداقة دائمة مع الكثير من الفيزيائيين من أمثال زوبرت أوبنهايمْر وجون سلاتر؛ غير أن تألق شهرته كان أعظم ما يكون في الدانمارك حيث حفظ اسمه معظم تلاميذ المدارس وعدّوه بطلاً من أبطالهم القوميين، حتى إن أحد أصحاب معامل الجعة وهبه منزلاً فخماً يقيم فيه طيلة حياته.

وقد أهّله رضاه عن شؤونه الشخصية وعن منزلته كرائد من رواد فيزياء الكم لأن ينظر في بعض جوانب نظرية الكم الفلسفية، ولا سيما إن كانت عشوائية الحوادث على الصعيد الذري تُبطل فكرة الحتمية الشاملة على الصعيد الكوني، فقد تأثرت آراؤه في عشرينيات هذا القرن بالميكانيك المصفوفي الذي طوّره ف. هايزنبرغ ليشمل مسلمتيْ بور، وبالنموذج الرياضي الرشيق لظواهر الكم الذي وضعه بول ديراك، وبتوسيع ل. دوبْرويْ وإ. شرودنغر لنظرية الكم كي «يوفقا بين الانقطاع والاستمرار في سمات الذرة» معتمديْن في ذلك على حدسهما «بأن مكونات المادة يمكن أن تكون خاضعة لقانون انتشار الحقول الموجية المستمرة»[4]. إلا أن العامل الحاسم في تطور وجهات نظر بور بشأن السببية كان اكتشاف هايزنبرغ في عام 1927 لعلاقات الارتياب في الفيزياء الذرية، إذ دفعت هذه العلاقات بهايزنبرغ لأن يستنتج أن في دقة القياسات «صفقة» يمكن أن تتناول الظواهر الذرية وذلك نتيجةً للاضطراب الذي تحدثه في المنظومة عملية القياس نفسها؛ فإذا حاولنا مثلاً تحديد موضع جسيم ما تحديداً دقيقاً فإن معرفة قيمة اندفاعه تصبح عندئذ أقل دقة.

وبعد أن عرف بور أنه يستحيل تحديد موضع الجسيم وطاقته في آن واحد معاً بدقة مثالية صاغ، بوحيٍ من هذه المعرفة، مبدأ التتامية **Complementarity** الذي «أكد أن الصيغة الإحصائية للسببية هي الصيغة الوحيدة التي يمكن أن تربط بين الظواهر التي تبدي فردية كمومية، بل إنها جعلت هذه الظواهر بسيطة لدرجة أن صيغة الوصف الإحصائي لميكانيك الكم أتت مناسبة تماماً لهذه الظواهر وفسرت كلياً كافة جوانبها الموصودة»[5]. وقد قبل معظم الفيزيائيين بمبدأ بور هذا، إلا أن أينشتاين ظل يقاومه بإصرار، وتقدم بحجج مختلفة للبرهان على عجز الطريقة الإحصائية تجاه الظواهر الذرية، ولكن بور نجح في دحض هذه الحجج؛ ومع ذلك فقد كان بور يأسف دائماً، لأن تحيز أينشتاين للسببية الصارمة في المجال الذري كان سبباً في قطع صلاته مع زملائه من الفيزيائيين الذين كانوا يسلّمون على نطاق واسع بمبدأ التتامية، بل يصعب أن نقدر إلى أي مدى هيأت اعتراضات أينشتاين الفرصة لبور كي يدعم تماسك نظريته.

وقد تعاون بور كذلك مع باوْلي وهايزنبرغ وديراك في تطبيق ميكانيك الكم على الحقل الكهرطيسي وبلغت هذه الجهود المتضافرة ذروتها عند نشر البحث الشهير الذي وضع «مبادئ استكمام الحقل الأساسية» وأثبت «أن علاقات هايزنبرغ في الارتياب تسري على قياس كميات الحقل كما تسري على قياس الكميات التحريكية»[6]. كذلك تجرأ بور، بعد اكتشاف ج. شادويك

J.Chadwick للنترون ، على ابتكار مفهومي نموذج قطرة السائل للنواة والنواة المركبة اللذيْن « جعلا فهم كيفية التصاق نواتين وتكوين نواة جديدة مع إصدار نوعيات مختلفة من الجسيمات أمراً ممكناً »[6] .

وعندما نشبت الحرب العالمية الثانية فتح بور أبواب معهده للعلماء الذين فروا من النازيين في الدول المحتلة ، ثم رفض في ربيع عام 1940 ، عند اجتياح الدانمارك ، أن يغادر بلده لأنه كان يعتقد أن وجوده في بلده ألزم من أي عمل كان يستطيع أن يقوم به في إنكلترا أو في الولايات المتحدة . إلا أن النازيين حاولوا أن يرشوه لكي يعمل إلى جانب دول المحور فرفض بور بإصرار أن يقوم بأي بحث يمكن أن يسهم في مجهود الحرب الألمانية . وفي عام 1943 كان عليه أن يفر إلى السويد طلباً للنجاة على زورق ، لأنه تلقى سلفاً معلومات بأن النازيين كانوا يخططون لاستخدامه نموذجاً لما سيحدث لأولئك الذين يرفضون التعاون مع الحكومة الألمانية .

ثم اتخذ بور طريقه أخيراً إلى الولايات المتحدة حيث عمل في مختبر لوس ألاموس التابع لمشروع منْهاتِن لمواصلة الحرب . وكان يعتقد مثل كثيرين من زملائه العلماء الذين انخرطوا في تطوير القنبلة الذرية بأن القنبلة الانشطارية يجب تطويرها ولو لردع النازيين عن عمل مثيل لها ، كما أنها يمكن أن تبدل مجرى الحرب . وكان بور يعرف حق المعرفة أنه بمجرد أن يفلت عفريت القنبلة الذرية من قمقمه فإن أي قوة عظمى في العالَم ستتمكن من صنع قنبلتها الخاصة ، لذلك أصبح في السنوات التي أعقبت الحرب منهمكاً في البحث عن سُبل لتجنب الحرب النووية بأن عمل على تكوين لجنة دولية لمراقبة تطوير الطاقة النووية واستخداماتها ، ومع ذلك فقد اصطدمت توسلاته بآذان صماء وذهبت كل اقتراحاته لروزفلت وترومان للقيام بعمل ملموس أدراج الرياح ، وكان بور في ذلك الوقت يشرف على إدارة معهده وعمل مستشاراً لمشاريع الحكومة الدانماركية وذلك لاستخدام القدرة النووية في الأغراض السلمية . وفي 18 تشرين الثاني / نوفمبر من عام 1962 أُصيب بنوبة قلبية ، فوضع الموت حداً لحياة واحد من أعظم العلماء المتعددي المواهب الذين عاشوا على مر الدهور ، فأخر بذلك ، إلى حد ما ، مجرى تلك التطورات التي كانت قد بدأت منذ ستة عقود بنظرية بلانك الكمومية ونظرية أينشتاين النسبوية .

مكانيك الكم

«قال همتي دمتي بلهجة استهزاء : «عندما أستعمل كلمة فإنها تعني ما أردت أن تعنيه بالتحديد ، لا أكثر ولا أقل» ، فقالت أليس : «المشكلة هي أنه يمكنك أن تجعل الكلمة تعني أشياء كثيرة مختلفة» ، فرد همتي : «بل المشكلة هي أي هذه الأشياء هو الرئيس ، هذا كل ما في الأمر»».
ـ ل . كارول*

لقد وجد الفيزيائيون أن نموذج ذرة بور ، على الرغم من كل نجاحاته والتحسينات التي أدخلها عليه معاصرو بور ، لم يكن من الوجهة الأساسية مُرضياً وذلك لسببين : أولاً لأنه تزاوج هجين بين قوانين الفيزياء التقليدية وبين قواعد كمومية خاصة أُدخلت اعتباطاً لتوضيح قدرٍ واسع من المشاهدات التي سرعان ما جمعها الفيزيائيون التجريبيون عن الذرة ، ثانياً : لأن هناك ظواهر معينة ، مثل شدة خطوط طيف الذرة ومدة دوام الحالات المثارة للذرات ، لا يمكن تفسيرها إطلاقاً بنموذج بور . ومع ذلك ، كان الفيزيائيون مقتنعين بأن ثمة نظرية جديدة تنطوي في ثنايا مسلماته وقوانينه الخاصة ، ولا بد من إظهارها ، ولكن ما من أحدٍ كان يعرف كيف يبني هذه النظرية قبل عام 1924 ، أي عندما بدأ لوي دوبرويُ L.De Broglie ثورته . ولكن المنحى الذي يجب أن يسير فيه المرء لكي يتوصل إلى هذه النظرية كان قد أشار إليه سابقاً أينشتاين في عام 1909 عندما أثبت أن للإشعاع الحراري داخل جوف (أو فرن) خاصة جسيمية وأخرى موجية في وقت واحد ، وأن هذين الوجهين يحدثان متواكبين فلا يمكن لأحدهما أن ينفصل عن الآخر . وكانت هذه خاصة ثورية في

* Lewis Carroll هو الاسم المستعار للعالم الرياضي والكاتب البريطاني تشارلز لوتوِدْج دودجسن Charles Lutwidge Dodgson (1832-1898) من مؤلفاته «إقليدس ومنافسوه» و«أليس في بلاد العجائب» . أما همتي دمتي فهو اسم أحد شخصيات هذه القصة .

الإشعاع إلى درجة أن أينشتاين كان يشعر أنه لا يمكن فهمها إلا بإحداث ثورة في طريقة تفكيرنا في المادة والطاقة ، وقد تنبأ « بأن المرحلة التالية في الفيزياء النظرية ستأتي بنظرية في الضوء يمكن تفسيرها بأنها نوع من اندماج نظرية الإصدار والأمواج » وكان أينشتاين يعني بنظرية الإصدار إصدارَ كموم (أو جسيمات) الضوء. وقد بدأت الثورة التي تنبأ بها في عام 1924 ، ولكنها ذهبت إلى أبعد من تقديره الذي تناول الإشعاع في البدء ، فشملت المادة أيضاً ، بل والممتع فعلاً أن نقطة انطلاقها كانت اكتشاف أينشتاين نفسه لتكافؤ الطاقة والمادة الذي عبَّر عنه في معادلته التي تقول إن الطاقة تساوي جداء الكتلة في مربع سرعة الضوء ، فكان هذا الاكتشاف السابق نوعاً من توحيد الجسيمات (الكتلة) والأمواج (الطاقة) ، ولكن الأهم هو أنه قاد دوبرويْ إلى أول صياغة لنظرية موجية للمادة (أي للجسيْمات).

فقد فكر دوبروي أنه لما كانت المادة تكافىء الطاقة وكانت الطاقة تساوي وفق صيغة بلانك ـــ جداء ثابت بلانك في التواتر ، فإن للمادة أيضاً تواترها المقترن بها ومن ثم فهي ذات مظهر موجي مثل الطاقة ، أي أن كل جسيم كالإلكترون مثلاً ، تواكبه موجة (تدعى اليوم موجة دوبرويْ) وله بالتالي طول موجة معين . ولحساب طول موجته هذا ، بدأ دوبروي من مقولة أينشتاين بأن للفوتون اندفاعاً، وفكَّر بأن الصيغة نفسها التي تربط طول موجة الفوتون باندفاعه يجب أن تربط اندفاع الجسيم بطول موجته . وكان أينشتاين قد أثبت في نظرية النسبية الخاصة أن اندفاع الفوتون يساوي حاصل قسمة طاقته (أي جداء ثابت بلانك في تواتره) على سرعته (أي سرعة الضوء) . وهكذا نجد من هذه العبارة أن اندفاع الفوتون يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على طول موجة الفوتون . وهنا طرح دوبروي ، قياساً على ذلك ، فرضيته الثورية التي تقول إن اندفاع الجسم (أي جداء كتلته في سرعته) يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على طول الموجة المواكبة له (التي كانت في ذلك الوقت مجرد افتراض) ، أو بعبار أخرى ، إن طول موجة دوبرويْ لجسيمٍ ما يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على اندفاع هذا الجسيم ، أي كلما أسرع الجسيم قصر طول موجته .

وهكذا كان تفكير دوبرويْ جريئاً غير فيزيائي ، وكان تصوره لموجة الجسيم غريباً غرابةً لم تُثر سوى قليل من الاهتمام إلى أن أشار ، بعدما يقرب من ثلاث سنوات ، فيزيائيان أمريكيان مجرِّبان هما دافيسون وجرْمَر إلى أن صيغة دوبرويْ التي تعطي طول موجة الإلكترون يمكن أن تكون صحيحة . ففي عام 1927 قذف دافيسون وجرْمَر بلورة نيكل بالإلكترونات واكتشفا أن الإلكترونات ارتدت عن سطح النيكل بطريقة مشابهة لارتداد الأشعة السينية (التي هي أمواج) ، فاستنتجا أن الإلكترونات تتفاعل مع الذرات في بلورة النيكل كما لو أنها أمواج ، ومع أن سلوك هذه الجسيمات (الإلكترونات) أثار حيرتهما جداً ، فإن سرعة الخاطر لديهما كانت كافية لأن يقوما بقياس طول موجة هذه الإلكترونات المنتثرة ، اعتماداً على طريقة توزعها في الاتجاه الذي ترتد فيه عن سطح النيكل ، فأثبتت قياساتهما أن أطوال موجات الإلكترونات تتفق مع نظريـة دوبرويْ في الجسيمات

مع أنهما لم يكونا مطلعين على هذه النظرية عند إجراء التجربة ، بيد أنهما كانا قد سمعا عن التطور الحاصل في ميكانيك الكم في جامعة غوتنْغِن في ألمانيا بإشراف الفيزيائي النظري ماكس بورن ، لذلك أرسلا إليه نتائجهما ، فتعرّف بورن فوراً أهمية عملهما ، وبذلك أصبحت نظرية دوبروي الموجية في الجسيمات أساساً لبناء فيزياء جديدة غريبة هي ميكانيك الكم .

كان قيام دوبرويْ بمثل هذه المساهمة الأساسية في دراسة المادة ، أو حتى تحوله إلى فيزيائي ، أمراً مفاجئاً ، إذ إنه كان أميراً من أبناء الدوق فكتور دوبرويْ وبوليني دارْماييه ، واسمه الكامل هو لوي ــ فكتور ــ بيير ــ ريمون دوبرويْ ، وقد ولد في عام 1892 في دييب (من النورمنْدّي في فرنسا) ، وتمتع بكل حياة الترف الرفيعة التي رُبّي فيها تربية أجداده . وعلى الرغم من أن الطبقة الراقية الحديثة غالباً ما تقوم بتصرفات طائشة ، فإن أسرة دوبرويْ كانت غارقة في التقاليد ، إذ غرس الجد الأكبر في أبنائه احترام السلطة والعزم على عدم الاتكال على ثروة الأسرة ؛ وكان لوي دوبرويْ قد بدأ في أول الأمر بدراسة العلوم الإنسانية وحصل في عام 1910 على إجازة في التاريخ بدرجة عالية ، إلا أن أخاه موريس ، الذي كان آنذاك فيزيائياً مرموقاً ، كان يطلعه بالتفصيل على مجريات مؤتمرات سلفيْ Solvay الشهيرة في الفيزياء التي كان قد حضر أول مؤتمر منها . ومع أن لوي لم يكن قد أبدى اهتماماً كبيراً بالمواضيع العلمية ولا سيما الفيزياء إلا أن مذكرات موريس عن المناقشات التي دارت بين أينشتاين وبلانك ولورنتز والعديد من العلماء الآخرين عن الفوتون وهل هو جسيم حقاً ، شدت انتباه أخيه الأصغر وأقنعته بتغيير اختصاصه . وهكذا تحول لوي بين عشية وضحاها تقريباً من كتب التاريخ إلى كتب العلم ، وحصل بعد ثلاث سنوات على إجازة في الفيزياء في عام 1913 .

ثم اندلعت الحرب العالمية الأولى فقطعت عليه خططه في أن ينذر نفسه لدراسة طبيعة المادة . ولكن السنوات الأربع التي قضاها مجنداً في الجيش الفرنسي لم تتبدد كلياً ، إذ فُرز إلى قطاع اللاسلكي في الجيش الفرنسي الذي كان متمركزاً في برج إيفل في باريس حيث وجد أن مسائل اللاسلكي التقنية لا تخلو من بعض الأهمية ؛ ولكن سلوك جسيمات أينشتاين الضوئية ظلت هاجسه الأول فأمضى سنوات الحرب الأربع في مركزه الآمن نسبياً ، لحسن الحظ ، في باريس ، وتجنب آلام هدر الدماء في القسم الشمالي من فرنسا حيث كانت قد أهدرت حياة الآلاف من مواطنيه .

وقد استأنف دوبرويْ بعد الحرب بحثه في الفوتون على كافة الأسس ، وتوجه اهتمامه إلى المتناقضات التي نشأت عن نظرية الكم في الإشعاع ، إذ تبين بالفعل أنه «إذا قلنا بالنظرية الجسيمية (أي فوتونات أينشتاين) فإننا لن نستطيع تفسير ظواهر التداخل والانعراج لأنها ظواهر تموجية بحتة ، وإذا قبلنا ، من جهة أخرى ، بالصورة الموجية فلن نجد سبيلاً إلى تعليل إشعاع الجسم الأسود »[1] . ولكن دوبرويْ لم يلجأ في حله إلى تفضيل نظرية واستبعاد أخرى ، بل إلى التسليم بصحة كلتا النظريتين الجسيمية والموجية في الضوء . فالضوء عنده يتألف في الوقت نفسه من أمواج وجسيمات

وذلك حسبما ذكر في خطبة جائزة نوبل: «إنه لمن الضروري إدخال المفهومين الجسيمي والموجي معاً... ولا بد من افتراض وجود الجسيمات في جميع الأحوال إلى جانب الأمواج».

وقد اقترح دوبروي في بادئ الأمر في أطروحته التي تقدم بها إلى كلية العلوم في باريس عام 1924 أن الإلكترون موجة وجسيم معاً، ولكن أفكاره لم تلق القبول فوراً لسببين: أولاً: لافتقار نظريته إلى الدعم التجريبي اللازم، ثم للتعارض الصارخ في محاولات التوفيق بين النظرتين إلى طبيعة الإلكترون؛ ومع ذلك فقد جذبت فكرته الجريئة انتباه عدد من الفيزيائيين، وكان قد أظهر اثنان منهم، وهما دافيسون وجرْمر عندما كانا يعملان في مختبرات شركة بل في نيويورك، أن انعراج الإلكترونات يحدث فعلاً بوساطة البلورات وأنه يتبع بإحكام قوانين الميكانيك الموجي، فأدى هذا البرهان المقنع على أفكار دوبرويْ الثورية إلى منحه جائزة نوبل للفيزياء في عام 1929، فليس غريباً إذاً أن تتطرق محاضرته في احتفال الجائزة في استوكهولم إلى مناقشة «الجوانب الموجية للإلكترون».

وقبل أن يتسلم دوبرويْ كرسي الفيزياء النظرية في جامعة باريس عام 1932 كان قد عمل أستاذاً محاضراً في السوربون ثم أستاذاً للفيزياء النظرية في معهد هنري بوانكاريه، ولكن دوبرويْ، مثله مثل أينشتاين، وجد أن زملاءه الشبان يتجاهلون محاولاته لاستنباط تفسير سببي لميكانيك الكم،



لوي — فيكتور — بيير — ريمون دوبرويْ (1892-)

إلا أنه كان في نظرهم أشبه بالديناصور بسبب إلحاحه المتعنّت على الحاجة إلى الحتمية في الفيزياء الحديثة، إلا إنه هو وأينشتاين كانا يكرهان التفسير الاحتمالي الذي عرضه بور وبورن وهايزنبرغ لميكانيك الكم، ولكن لم يجد أيٌّ منهما سبيلاً إلى دحض حجج هؤلاء الذين كانوا يؤيدون التفسير الإحصائي.

والحق أن لوي دوبرويْ لم يكن الشخص الرئيس في تطوير الفيزياء الجديدة، مع أنه كان أحد مؤسسيها، إذ يعود الفضل في تطوير ميكانيك الكم، في اتجاهين مختلفين ومنفصلين في الظاهر إلى بورْن وهايزنبرغ وجوردان (في الميكانيك المصفوفي)، وإلى إروين شرودنغر (الميكانيك الموجي)، كما قام بول ديراك و ولفغانْغ باولي بدور مهم جداً ومسيطر غالباً في هذا العمل الرائع.

وقد بدأ تطوير الميكانيك المصفوفي عام 1925 عندما أعلن هايزنبرغ ثورته على الفيزياء التقليدية وعلى النظرية الهجينة التقليدية ـــ الكمومية متذرعاً بأن الفيزياء بحاجة إلى ميكانيك نظري كمومي جديد له مكوناته الخاصة من القواعد والقوانين التي لا تحتفظ من الميكانيك التقليدي إلا بأكثر مفاهيمه شمولاً، وكانت حجته الأساسية أن ميكانيك الكم يجب ألا يعالج سوى الكميات التي يمكن رصدها، أما تلك التي لا يمكن رصدها مثل مدارات بور فيجب استبعادها عن الفيزياء الذرية.

ولم يعد هايزنبرغ يتحدث عن الإلكترون بأنه يقعَ في نقطة معينة أو على مدار خاص في الذرة، إذ كان عليه أن يستعيض عن الإلكترون كنقطة مجموعةَ أعداد مرتبة تشير إلى أن الإلكترون ليس كمية عددية وإنما هو مصفوفة (مجموعة أعداد مرتبة)، كما استعاض هيزنبرغ عن اندفاع الجسيم النيوتني مصفوفةً تتألف من عدة قيمٍ ممكنة لاندفاع الجسيم التقليدي. وهكذا بدأ الميكانيك المصفوفي الذي طوره بعد ذلك بورْن وهايزنبرغ وجورْدان إلى تقانة رياضية كاملة قائمة بذاتها تُستخدم لحل المسائل الذرية.

ولمّا كان جداء مصفوفتين يختلف باختلاف ترتيب ضربهما فلا بد من استخدام جبر غير تبديلي في الميكانيك المصفوفي، أي إذا عدنا إلى الميكانيك النيوتني وكان q موضع الإلكترون و p اندفاعه، فإن p و q تتعينان بالتحديد ولا يختلف جداؤهما باختلاف ترتيبهما؛ أما في الميكانيك المصفوفي فإن p و q مصفوفتان وليسا عددين محدّدين، لذلك فإن الجداء pq لا يساوي الجداء qp. وقد أثبت هايزنبرغ أن لا تبديلية الضرب هذه في الميكانيك المصفوفي تعني أن هناك مبدأ ارتياب يتحكم في الكميات المستخدمة في الضرب (مبدأ هايزنبرغ في اللاحتمية) بمعنى أن حدي الجداء (وهما q و p في مثالنا) لا يمكن قياسهما معاً بدقة لا متناهية، أي كلما دققنا في قياس موضع الإلكترون ازداد الارتياب في معرفتنا لاندفاعه والعكس بالعكس. أو بعبارة أخرى لا يمكن أن يكون جداء الخطأ في معرفة p بالخطأ في معرفة q أقل من حاصل قسمة ثابت بلانك على العدد 2π.

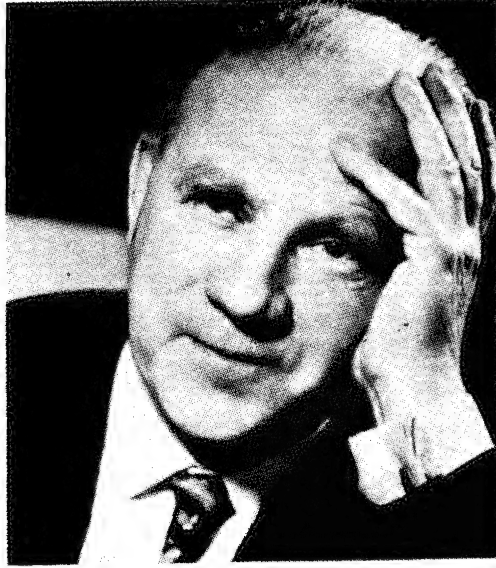
وقد عرض هايزنبرغ مبدأ الارتياب من وجهة نظر فيزيائية بأن حلل عملية قياس موضع الإلكترون حين يتحرك على خط مستقيم بسرعة ثابتة، فوجد أنه، لكي يحدّد المجرب موضع الإلكترون على المستقيم، عليه «أن يوجه إليه نظره»، أي يجب أن يسلط عليه حزمة ضوئية ليصطدم أحد فوتوناتها بالإلكترون ويرتد عنه إلى عيننا فنستنتج عندئذ موضع الإلكترون بتطبيق مبدأ في البصريات بسيط هو قانون الانعكاس، ولكن لا بد أن ينقل الفوتون شيئاً من اندفاعه إلى الإلكترون عند ارتداده عنه، الأمر الذي يخلّف خطأً في معرفتنا لاندفاع الإلكترون، وكلما توخينا الدقة في تحديد وضع الإلكترون ازداد الارتياب في معرفة اندفاعه، والسبب في ذلك هو أن علينا أن نقذف الإلكترون بفوتونات ذات موجات قصيرة جداً لكي نحدّد موضعه بدقة أكبر، ولكن ذلك يعني أن نقذفه بفوتونات طاقتها أكبر، أي اندفاعها أكبر، الأمر الذي يؤدي إلى ارتياب أفدح في اندفاع الإلكترون. وهذا كله ناجم عن وجود كم الفعل الذي يعرف بثابت بلانك h (كم الفعل)، وهكذا نعجز عن التحكم في اضطراب قياساتنا الناتج عن الفوتون.

وينطبق مبدأ هايزنبرغ في الارتياب، الذي طُبق أول الأمر على الموضع والاندفاع، على أزواج أخرى أيضاً من الكميات المقيسة التي يدعى كل زوجين منها «متغيرين مترافقين» والتي تقوم بدور مهم في ميكانيك الكم لأنها تضع حدوداً للحتمية في الفيزياء الكمومية. وهناك مثال آخر عن زوجين مترافقين مهمّيْن من المتحولات هما الزمن والطاقة. فالريبة المقترنة بهاتين الكميتين يُعبَّر عنها بما يلي: كلما طال لدينا الزمن لقياس طاقة الجسيم زادت الدقة في قياسها، أي إذا قمنا بالقياس في زمن قصير جداً فإن الخطأ في قياس الطاقة يصبح جسيماً جداً.

ونستطيع أن نجعل مبدأ الارتياب أقرب إلى الفهم إلى حدٍ ما بأن نستنتجه من وجود كم الفعل h، فهذا الكم يعني أن الفعل المقترن بجسيم لا يمكن أن يكون أقل من h (وحدة الفعل)، فإذا حددنا موضع الجسيم في مجالٍ صغير من مساره، كان طول هذا المجال هو الخطأ في معرفة وضعه، ويكون تغير فعل الجسيْم في هذا المجال مساوياً جداء طوله في اندفاع الجسيْم، ولكن هذا الجداء لا يمكن أن يكون أقل من h، لذلك يجب أن يكون اندفاع الجسيم كبيراً بما يكفي لكي لا يجعل جداءه في طول المجال يهبط إلى ما دون h، ولما كان الخطأ في معرفة وضع الجسيم (الطول) يتناقص فإن اندفاع الجسيم والخطأ في معرفته يتزايد، وهذا هو مبدأ الارتياب الذي ينتج، كما تدل هذه الدراسة، من اكتشاف بلانك لكم الفعل.

وُلد فرنر كارل هايزنبرغ (1910-1976) في فُرْزبورغ Würzburg في ألمانيا وكان أبوه أستاذاً للعلوم الإنسانية في جامعة مونيخ، فشب هايزنبرغ في أسرة رفَعت مكانة الآداب الكلاسيكية، لذلك فإن إعجاب والده بتاريخ أوربا الثقافي كان له أثره ولا شك في قرار فرنر فيما بعد بأن يظل مقيماً في بلده لكي «يحمل مشعل» ثقافة ألمانيا عندما وصلت النازية إلى السلطة. وكان قد تلقى

تعليمه المبكر في ثانوية مكسيمليان حيث درس الكلاسيكيات محبذاً أعمال الفلاسفة اليونانيين الأوائل العلمية من أفلاطون وأرسطو إلى ديموقريطس وتالس. وقد ظل اهتمامه بالعلاقة بين الفلسفة والعلم ملازماً له طيلة مسيرته العلمية، حتى لقد حفل الكثير من كتبه المتأخرة بالملاحظات الفلسفية، كما أن تآلفه مع أعمال العلم التقليدية ساعده على ملاحظة الطريقة غير السوية التي كانت قد فُهمت بها نظريات الفيزياء عن طبيعة الكون، وعلى فهمها، ومعرفة الطريقة التي قُبلت بها أو تم إهمالها، وكذلك على مقاربة أبحاثه الخاصة بصبر وأسلوب منهجي.



فرنر كارْل هايزنبرغ (1901-1976)

وقد تخرج هايزنبرغ من الثانوية في عام 1920 وكان قد درس الفيزياء والفلسفة، كما كان له اهتمام بالموسيقى، غير أن جاذبية الفيزياء النظرية كانت هي السائدة، فذهب إلى زيارة أرثر سُمرفلد A.Sommerfeld الذي كان آنذاك أحد الرُواد النظريين الذريين في العالم، وسأله إن كان يسمح له بدراسة الفيزياء النظرية، ففوجيء سمرفلْد إلى حدٍ ما بجرأة طلب هايزنبرغ واقترح عليه أن يُكْمل دروس الفيزياء الأساسية قبل أن يختص في مجال معين، فقبل هايزنبرغ نصيحته وبدأ دراسته في جامعة مونيخ حيث كان سمرفلْد يعلّم، كما أُتيح له حضور ندوات سمرفلد حيث كان يحافظ على رباطة جأشه أثناء مناقشة طلاب الصفوف العليا والطلاب المتخرجين، وقد برهن هايزنبرغ منذ البداية على تمكنٍ لا يجارى من موضوعات دراسته واجتاز امتحان الدكتوراه في الفيزياء في عام 1923 أي بعد ستة فصول دراسية لا غير من انتسابه، ثم انتقل إلى جامعة غوتنغن حيث كان ماكس بورن

يشرف على برنامجٍ حوّل قسم الفيزياء في المعهد إلى أحد أرقى الأقسام في العالم، فعمل هايزنبرغ مساعداً لبورن ثم طور في السنتين التاليتين أسس ما أصبح يُعرف بميكانيك الكم. وفي عام 1925 أنهى نشرة علمية ثورية لخص فيها أفكاره وتعرَّف بورن قيمتها العلمية فقدمها إلى المجلة الفيزيائية Zeitschift für Physik التي نشرتها. وفي إثر ذلك تعاون هايزنبرغ مع بورن وجوردان على إدخال تحسينات إضافية في نظريته ولا سيما فيما أسفر عن الصياغة الراهنة للجبر اللا تبديلي الذي يعبَّر به عن الميكانيك المصفوفي. وهكذا سارت الأمور تدريجياً بهايزنبرغ نحو مبدئها في الارتياب، إذ كان « واضحاً له أنه إذا كانت النظرية لا تعالج سوى كميات فيزيائية يمكن رصدها مباشرة فإنها يجب أن توضع عندئذ في صيغة لا يمكن الحديث فيها في آن واحد عن وضعٍ واندفاعٍ محدَّدين تماماً، ذلك لأن قياس أيٍ منهما لا بد أن يؤثر في الآخر فيشوِّش بالتالي معرفتنا عنه »[2]. وقد غادر هايزنبرغ بعد ذلك غوتنغن ليعمل ثلاث سنوات في كوبنهاغن مع نيلز بور، ثم أصبح بعدئذ أستاذاً للفيزياء النظرية في جامعة ليبزغ حيث ظل حتى عام 1941. وكانت هذه المرحلة من حياته خصبة إلى أبعد الحدود، إذ بيَّن كيف يمكن تطبيق ميكانيك الكم في دراسة الظواهر المغنطيسية، كما تعاون مع ولفغانغ باولي « على وضع أسس التحريك الكهربائي الكمومي ونظرية الحقل الكمومية » وأدخل مفهوم السبين النظيري « الذي يُعدُّ فيه النترون والبروتون حالين مختلفين لطاقة جسيم أساسي واحد هو النكليون »[3]. وفي عام 1934 تلقى هايزنبرغ جائزة نوبل للفيزياء، وفي عام 1942 كُلِّف بصفته أحد أبرز الفيزيائيين في ألمانيا بإدارة معهد ماكس بلانك للفيزياء في برلين، وظل هناك حتى نهاية الحرب، وقد حضه بعضهم على أن ينضم إلى الأساتذة المهاجرين من ألمانيا بسبب اضطهاد النازيين لطليعة رجال الفكر عامة واليهود خاصة، ولكن ولاءه لدولةِ ألمانيا جعله يختار البقاء على الرغم من كراهيته لحكومة هتلر، إذ كان يعتقد مثل ماكس بلانك أن عليه البقاء لكي يُبقي شهرةَ ألمانيا العلمية في العالم كله. وفي عام 1945، حين انتهت الحرب، عاد هايزنبرغ إلى غوتنغن ليصبح مديراً لمعهد ماكس بلانك حيث طور نظريته في المصفوفة المشتتة « التي تحاول وصف الحوادث بدلالة ما يراه المرء فحسب في بداية التقاء منظومتين معاً (نواتان مثلاً أو بروتونان) وانتهاء هذا اللقاء، أي بعد أن تكونا قد تفاعلتا وانفصلتا »[4]. وقد أمضى هايزنبرغ آخر حياته العلمية وهو يحاول الوصول إلى خواص الجسيمات الأساسية مثل الإلكترون والبروتون، كما ألف في الفلسفة والعلم كتباً مثل « عبر الحدود » و« فيزياء وفلسفة »*.

وعلى الرغم من أنه هو وباولي حلا عدداً من المسائل الأولية باستخدام ميكانيك المصفوفات، إلا أن معظم الفيزيائيين كانوا يجدون صعوبة كبيرة في استعمال بنية هذا الحساب الرياضية، ولولا أن شرودنغر اكتشف الميكانيك الموجي لكان تطور ميكانيك الكم بطيئاً جداً، إذ استوحى شرودنغر

---

* ترجم الكتاب الأخير إلى العربية الدكتور أدهم السمان أستاذ الفيزياء في جامعة دمشق عام 1989.

من خاصة الجسيمات الموجية (أي المثنوية موجة ــ جسيم كما ظهرت في بحث دوبروي) ما سَما به إلى أقصى درجات الإبداع التي تجلت في وضع ما ندعوه اليوم «معادلة الإلكترون الموجية» مع أنها في حقيقتها أعم من ذلك بكثير، لأنها تنطبق على كثير من الجسيمات لا على الإلكترون وحده.

وُلد إروين شرودنغر (1887-1961) في فيينا عندما كانت مركز أوربا الثقافي وعاصمة الإمبراطورية النمساوية ــ المجرية التي تفككت. وكان والده رودُلْف قد وقف نفسه على الرسم الإيطالي وعلم النبات مع أنه كان قد تدرب للعمل الصيدلاني. وكانت أسرة شرودنغر في وضع مالي جيد جداً، فكان لديها الوقت والقدرة على تعريفه عراقة فيينا التاريخية وثروتها الثقافية، وعلّم الوالدان ابنهما تقدير الفنون والتمتع بمتابعة المعرفة ذاتها، ولم يمض وقت طويل على إروين في فيينا الجميلة المنظر حتى نما لديه حب جارف للحياة واهتمام بالسيرورات الحيوية (البيولوجية) والمتعضيات الحية.

تلقى إروين تعليمه الأوّلي في ثانوية فيينا حيث درس العلوم والرياضيات، وكان مغرماً أيضاً بالأدب ويستمتع بالشعر واللغات. وكان مثل أينشتاين لا يألف التعلم بطريقة الصَّم (من دون فهم)، ولكن لم ينم لديه، مثلما فعل أينشتاين في سنوات دراسته، كرهٌ للسلطة، ومع ذلك، كان إروين يفضل أن ينظِّم مقرراته وفق ذوقه الخاص، وقد نال درجات عالية في دروسه. وفي عام 1906 دخل جامعة فيينا حيث درس الفيزياء التقليدية، وكان أحد موضوعات دراسته في فيينا فيزياء الأوساط المتصلة (المستمرة) التي زودته بأداة فكرية لفهم نظرية الضوء الموجية، فكان فهمه هذا ذا أهمية حاسمة في صياغة معادلة الموجة (موجة دوبروي) التي أنجزها فيما بعد.

وبعد أن تخرج شرودنغر من جامعة فيينا في عام 1910، عُيِّن فيها معاون أستاذ (معيداً)، فكان عليه، برغم اهتماماته النظرية، تحضير التجارب المختبرية للطلاب، فلم يكن راضياً عن عمله في المختبر لأنه كان يرى نفسه فيزيائياً نظرياً، ولكنه لم يجد عملاً كهذا،لذلك كان مكرهاً على ابتلاع غروره والقيام بعمله في المختبر على أفضل وجه، ومع ذلك، لم يكن يرى في نفسه أكثر من مجرب متوسط المهارة.

أمضى شرودنغر سنوات الحرب العالمية الأولى ضابطاً في المدفعية ثم استأنف عمله الجامعي في عام 1920 مساعداً للفيزيائي الذائع الصيت وِلْهلم فين W.Wien الذي كان أول عالم تعرَّف في العام 1905 (حين كان رئيس تحرير المجلة الفيزيائية Annalen der Physik) ألمعية النشرات العلمية الثلاثة التي أرسلها أينشتاين عن الأثر الكهرضوئي والحركة البراونية ونظرية النسبية الخاصة. وقد قبل شرودنغر بعد ذلك تعيينه على التوالي في شتوتْغَرت وبرسْلاوْ قبل أن يخلف ماكس فون لاوْ Max Von Laue في منصب أستاذ الفيزياء في جامعة زوريخ حيث أمضى أكثر سنواته إنتاجاً في كل مسيرته الأكاديمية، إذ نشر بحوثاً تقنية عن التحريك الحراري (الترموديناميك) والميكانيك الإحصائي والحرارة النوعية للأجسام الصلبة والطيف الذري كما صاغ أيضاً معادلته الموجية لأنه كان يمقت فكرة القفزات



إروين شرودنغر (1887 - 1961)

الكمومية ، «لذلك حاول أن يعود إلى نوع من الوصف التقليدي الاستمراري بأن عالج الطيف على أنه حلّ لمسألة القيمة الذاتية eigen value*، إذ فكر أنه إذا كانت صيغ الاهتزاز المنفصلة في منظومة كلاسيكية (مألوفة) (كوتر كان مثلاً) يمكن الحصول عليها بصفتها حلاً لمسألة القيمة الذاتية ، فإن حالات بور الاستقرارية يمكن أن تكون كذلك أيضاً ، وبذلك نستطيع أن نتخلص ، كما رأى ، من فكرة القفزات الكمومية ونضع مكانها مفهوم الانتقالات من صيغة اهتزاز (قيمة ذاتية) إلى أخرى»[5].

وقد جاء اكتشاف شرودنغر لمعادلته الموجية نتيجة دمجه عمل دوبروي ، المتعلق بطبيعة الإلكترون الموجية ، بالهيكل الرياضي الذي ابتكره وليم هاملتون لميكانيك نيوتن[5] ، وأدت مهارته في التوفيق بين عملي هذين الفيزيائيين إلى صياغة معادلة ذات شان عظيم عند الفيزيائيين في العصر

* إحدى القيم الرقمية λ التي تحقق $T(v) = \lambda v$ ، حيث T مؤثر خطي على فضاء متجهات و v متجه ذاتي (من معجم مكروهيل العلمي).

الحديث ، وقد أُقر له بذلك عام 1933 عندما تقاسم هو وبول ديراك جائزة نوبل للفيزياء . ولم يكن شرودنغر ينظر إلى الإلكترون كجسيم وإنما كموجة حقيقية تنتشر في الفضاء بمختلف التوضعات ، لذلك رفض تأويل بورن الإحصائي لميكانيك الكم ، كما رفض المثنوية موجة ــ جسيم في المادة[6] . وقد أثارت معارضته لتفسير ميكانيك الكم على النحو الذي اقترحه بورن حواراً ودياً ولكنه طويل الأمد مع هذا الأخير امتد إلى كل ما بقي لهما من مسيرتهما العلمية .

وفي عام 1927 دُعي شرودنغر إلى برلين بعد اعتزال ماكس بلانك العمل ليصبح خلفه واحتفظ بهذا المنصب ست سنوات وقد حفزه اتصاله اليومي مع الباحثين المتميزين هناك حافزاً قوياً ، ولكنه قرر في عام 1933 عند استلام النازيين للسلطة ، التخلي عن منصبه ومغادرة البلاد . ولم يكن شرودنغر يهودياً ، كما أن جنسيته النمساوية لم تمنعه من التمتع بحياة رغدة وافرة لو أنه اختار التعاون مع الحكومة ولكنه شك في أن يستطيع العيش في ألمانيا الهتلرية ولا سيما حين أجبر كثير من زملائه بما فيهم بورن على مغادرة البلاد بسبب قوانين النازيين العنصرية ، فاستلم شرودنغر منصب زمالة في أكسفورد حيث ظل يعلّم مدة عامين قبل أن ينتقل إلى جامعة غراتز Graz في عام 1936 .

وفي عام 1938 أرغمه إلحاق النمسا بألمانيا على الهرب إلى إيطاليا ومن ثم إلى برنستون حيث أقام مؤقتاً ثم أصبح بعدئذ مديراً لكلية الفيزياء النظرية في معهد الدراسات المتقدمة في دبْلن في إيرلندا حيث ظل حتى اعتزاله العمل عام 1955 . ومع أنه ثابر على البحث النظري في الفيزياء فإن أشهر أعماله في دبلن كان كتاباً صغيراً نُشر عام 1944 بعنوان « ما هي الحياة ؟ » حاول فيه أن يبين هل يمكن أن تفسِّر القفزاتُ الكمومية ظواهر بيولوجية كالوراثة مثلاً ، ومع أن وجهات نظر شرودنغر البيولوجية كان قد استُبدل بها تطوراتٌ أحدث عهداً في مجالها ، كاكتشاف جزيء الحمض الريبي النووي المنقوص الأكسجين (دنا DNA) فإن كتابه فاز بشعبية واسعة شجعت عدداً من الفيزيائيين على دراسة البيولوجية الجزيئية .

وقد عاد شرودنغر ، بعد اعتزاله عام 1955 ، من دبلن إلى محبوبته فيينا ، حيث منح كثيراً من آيات التكريم ، ولم ينقطع عن التأمل في مشاكل الفيزياء والبيولوجية إلى أن وافته المنية عام 1961 ، ولكنه أمضى كذلك الكثير من وقته متجولاً في شوارع فيينا وضواحيها القريبة متمتعاً بمناظر وصخب هذه المدينة التي أثرت روحها الثقافية والفنية تأثيراً عميقاً في تربيته وهو ما يزال يافعاً وغذَّت فيه مواهبه المتعددة الاتجاهات .

كان شرودنغر عالماً نظرياً لامعاً نأى بنفسه عن نظرية بور في الذرة ، لأنه كان يمقت فكرة مدارات الإلكترون المميَّزة وقفزاته المنفصلة من مدار إلى آخر ، فكان ، وهو المشبَع بروح الفيزياء التقليدية ، ضليعاً في ميدان المعادلات الموجية التقليدية وفي حلول المسائل التي تطرحها النُظم المهتزة كالأوتار لدى نقرها مثلاً ، أو الصفائح المهتزة . وكان بتوجهه هذا إلى الفيزياء التقليدية ومخالفته نموذج

ذرة بور محابياً جداً لنظرية دوبروي الموجية في المادة، لأنه كان يرى فيها طريقة جديدة بأن يُستبدل بنموذج بور المنفصل وبالميكانيك المصفوفي المزعج معادلةٌ موجية وحيدة للإلكترون يمكن أن نحصل منها على كل خواص نموذج بور والميكانيك المصفوفي؛ هذا بالإضافة إلى أن معادلة موجية كهذه ستكون ولا بد من تقاليد الفيزياء التقليدية التي تكثر فيها المعادلات الموجية والتي كان الفيزيائيون يعرفون كيف يعالجونها وكيف يحلونها فيستطيعون عندئذ أن يتعاملوا مع ميكانيك الكم في صورته الموجية.

وهكذا عاد شرودنغر، بغية الحصول على معادلته الموجية، إلى الأسلوب التقليدي (النيوتني) لكي يصف الإلكترون المتحرك في حقلٍ كهراكدي (حقل البروتون في ذرة الهدروجين) فلاحظ أنه إذا استبدل بالاندفاع في العبارة التقليدية التي تعطي طاقة الإلكترون معاملاً رياضياً (هو معدل تغير موجة الإلكترون بالنسبة إلى تغير وضعه)، واستبدل بالطاقة نفسها معاملاً آخر (هو معدل تغير موجة الإلكترون بالنسبة إلى الزمن) فإنه سيحصل بذلك على المعادلة الموجية التي يريدها. وكان مقتنعاً أنه بعمله هذا يكون قد أعاد إلى الفيزياء استمراريتها وأزاح عنها كابوس المدارات المميَّزة البغيضة وانفصالاتها المصاحبة لها، ولكنه في حقيقة الأمر لم يفعل ذلك لأن الانفصالات أصبحت مستترة خلف الموجة نفسها.

وسرعان ما طبق شرودنغر طريقته هذه لكي يحصل على معادلة الإلكترون الموجية عند حركته في حقل البروتون الكهراكدي، فكتب المعادلات التقليدية (النيوتنية) لطاقة الإلكترون واستبدل معامليْه بالاندفاع وبالطاقة نفسها في هذه العبارة، ثم طبق العبارة كاملةً، بصفتها مؤثراً، على دالة للمكان والزمان (وهي كمية تتغير بتغير الزمن وموضع الإلكترون) فحصل بذلك على معادلته الموجية وهنا أثبت شرودنغر، بمهارته المعروفة في معالجة معادلات كهذه، بأن هذه المعادلة الموجية تتجزأ إلى ثلاث معادلات متمايزة، تعطي إحداها مدارات بور مع أعدادها الكمومية الرئيسية (حالات طاقة الإلكترون)، وتعطي الثانية أشكال هذه المدارات (أي الأعداد الكمومية السمتية)، وتعطي الثالثة الاتجاهات المتميزة التي يتخذها محور دوران الذرة في حقل مغنطيسي (أي الأعداد الكمومية المغنطيسية المتميزة). وهكذا استطاع شرودنغر، باستعمال معادلة واحدة، أنْ يحصل، في غضون ساعات، على كل ما ظل الفيزيائيون يكافحون لأكثر من عقد من الزمان كي يحصلوا عليه بسلسلة من القواعد الاعتباطية المهيَّأة لهذا الغرض، فجعل هذا النجاح من الميكانيك الموجي الأداة الرئيسية في حل المسائل الذرية، في حين لم يقم الميكانيك المصفوفي إلا بدور ضئيل في تطوير ميكانيك الكم تطويراً سريعاً فيما بعد.

ولكن على الرغم من النجاح العظيم لمعادلة شرودنغر الموجية، فقد ظل يكتنفها الغموض الكثيف الذي لا يزال من دون توضيح، وأثارت العديد من القضايا التي كان أكثرها إلحاحاً،

ولا يزال، هو طبيعة الموجة المواكبة للإلكترون. ففي جميع الظواهر الموجية التقليدية تكون الموجة حقيقية أو كياناً فيزيائياً يمكن رصده،كما يمكن قياس شدته بأجهزة فيزيائية؛ فمثلاً تعطى شدة المنبع الضوئي أو المصدر الصوتي بمربع سعة (أو كبر اهتزازة) الموجة الضوئية أو الصوتية الصادرة عن المنبع. ولكن موجة شرودنغر ليست موجة حقيقية لأن عبارتها تحوي العدد التخيلي $\sqrt{-1}$ فهي بالتالي كمية عقدية ولذلك لا يمكن قياسها.

وقد هيأت هذه السمة غير الفيزيائية للموجة المقترنة بجسيم مؤيدي الميكانيك المصفوفي إلى قبول الميكانيك الموجي مع بعض التحفظات الشديدة التي زالت أخيراً نهائياً عندما اقترح أحد مؤسسي الميكانيك المصفوفي وهو ماكس بورن تأويلاً جديداً جذرياً إلى أبعد الحدود لهذه الموجة، وهو أنها تعطي احتمال العثور على الإلكترون في منطقة معينة من الفضاء، ولكي نكون أكثر دقة ونشرح هذا شرحاً أكمل دعونا ننظر في إلكترون يتجول في علبة مغلقة، فنحن لا نعرف شيئاً عن وضعه في أي لحظة كانت، لكننا نستطيع وصف حركته بمعادلة شرودنغر التي إذا حللناها حصلنا منها على دالة الإلكترون الموجية، فتزيدنا عندئذ علماً عن المكان الذي نجد فيه الإلكترون. ففي أول الأمر، نستبدل بالعدد التخيلي $\sqrt{-1}$ أينما وجد في دالة الموجة العدد $-\sqrt{-1}$،فنحصل على دالة الموجة العقدية المزاوجة للدالة السابقة، فإذا ضربنا الآن دالة الموجة بمزاوجتها حصلنا على كمية هي القيمة المطلقة لدالة الموجة، وهي التي تعطينا احتمال العثور على الإلكترون في أي نقطة نريدها من العلبة. وهكذا يتضح أن موجة شرودنغر هي موجة احتمال تبعاً لتأويل بور.

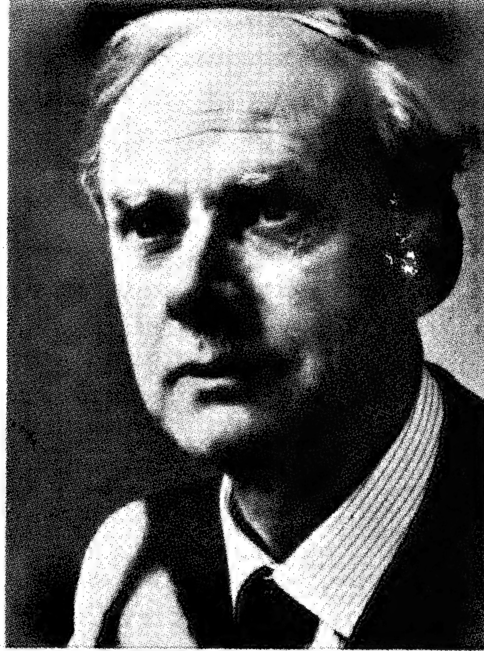
وقد سلّم الجميع بصورة الدالة الموجية هذه لأنها تساعد على حساب كل أنواع الاحتمالات المتعلقة بالإلكترون؛ فيمكن مثلاً أن نحسب منها احتمال أن يقفز الإلكترون هابطاً في ذرة مثارة إلى أي سوية أدنى نريدها مُصدراً عندئذ فوتوناً ذا تواتر خاص، كما يمكن أن نحسب بهذه الطريقة مُدد بقاء الذرات مثارة (أي مدد الحالات المثارة)، وكذلك شدات خطوطها الطيفية؛ وهذه أمور لا يمكن تحقيقها بنظرية بور.

ولما كان خضوع المسائل الذرية لمعادلة شرودنغر يزداد باستمرار فإن هذه المعادلة هيمنت على الفيزياء الذرية حتى لقد أصبحت مرادفة لميكانيك الكم. ومع ذلك بدأت تظهر معها بعض الصعوبات التي أمكن التغلب على بعضها، ولكن بعضها الآخر كان خللاً في صلب النظرية، إذ إن النظرية كانت قد بُنيت لتعامِل الزمان بطريقة خاصة تختلف عن طريقة تعاملها مع المكان، وهذا فرق لا يمكن التغاضي عنه لأنه يتعارض مع متطلبات نظرية النسبية التي تقتضي أن يعامَل المكان والزمان على قدم المساواة، أي أن معادلة شرودنغر ليست صامدة نسبوياً كما يجب أن تكون جميع النظريات الصحيحة بل تتغير عند التحول من جملة إحداثيات مكانية إلى جملة أخرى. وكان شرودنغر وعلية الفيزيائيين الآخرين جميعاً يعرفون صحة هذا الأمر، ولكنهم لم يكونوا يعرفون كيف

يحصلون على معادلة الإلكترون الموجية الصحيحة نسبوياً.

وكان السبب في ظهور هذا الخلَل في معادلة شرودنغر الموجية، أي لا نسبويتها، هو أنها استُنتجت من العلاقة النيوتنية بين طاقة الجسيم واندفاعه بدلاً من أن تُستنتج من علاقة أينشتاين، وقد تنبه شرودنغر إلى ذلك فحصل فعلاً على المعادلة الموجية النسبوية الصحيحة بأن بدأ من معادلة أينشتاين «طاقة ــ اندفاع» الكمومية ثم استبدل بالطاقة وبالاندفاع المؤثرَيْن الخاصين بهما (وهما مؤثرات الزمن للطاقة ومؤثرات المكان للاندفاع). ولكن هذه المعادلة أدت إلى التنبؤ بظواهر ليس لها معنى فيزيائي لأن حلولها (أو الدوال الموجية) تعطي احتمالات الحوادث بقيم سالبة مثلما تعطيها بقيم موجبة، في حين أن الاحتمالات السالبة لا يمكن تأويلها فيزيائياً. وهكذا استمرت هذه الصعوبات إلى أن وضع الفيزيائي النظري البريطاني العظيم بول ديراك معادلته التي تُعرف اليوم بأنها «معادلة ديراك النسبوية للإلكترون».

ولد بول أندريان موريس ديراك P.An.M.Dirac (1902-1984) في بريستول بإنكلترا وكان أبوه سويسرياً وأمه إنكليزية. وكان في طفولته خجولاً منعزلاً.ومع أنه كان يتكلم اللغتين الفرنسية



بول أندريان موريس ديراك (1902-1984)

والإنكليزية فإنه لم يتحدث مطولاً بأيٍ منهما إلا نادراً ، وهكذا كان تلكؤه في مواصلة الحديث سبباً في قلق أبويه عليه . ولكن سرعان ما أثبت ديراك ، من أعماله المدرسية الرائعة في المرحلتين الابتدائية والثانوية اللتين قضاهما في بريستول ، أنه ليس متخلفاً عقلياً . وكان ميالاً للرياضيات ولكن ليس لذاتها بل راح يبحث عن مهمة تمكنه من استخدام الرياضيات بطريقة عملية.لذلك استقر رأيه على الهندسة ، فدرس الهندسة الكهربائية في جامعة بريستول ونال درجة البكالوريوس في عام 1921 ، ولكنه لم يستطع أن يجد مهنة هندسية.ولربما كان ميله للأعداد سبباً في أن يصبح مهتماً بالفيزياء ، بيد أنه شعر بأن تحوله إلى فيزيائي يتطلب مزيداً من دراسة الرياضيات،فقضى العامين التاليين وهو منغمس في هذا الموضوع في بريستول مع أنه لم يتبع برنامجاً نظامياً لنيل درجة ، ثم ما إن انتهى من شحذ مهاراته التحليلية إلى درجة الكفاية حتى غادر بريستول ليعمل مساعد بحث في الرياضيات في كلية القديس جون في كمبردج حيث تابع في أثناء عمله دراساته الرياضية ونال درجة دكتوراه فلسفة في الرياضيات في عام 1926 ، وقد ظل يعمل زميلاً في كلية القديس جون لعدة سنوات إلى أن عُيِّن في عام 1932 فيما يمكن أن يكون أشهر كرسي في العالم ، وهو كرسي أستاذ الرياضيات اللوقي Luciasian في كمبردج ، وهو المنصب الذي استلمه من قبل إسحق نيوتن ، فكان نيل ديراك لهذا الشرف العظيم ، وهو ما يزال شاباً ، برهاناً على أنه قد اعتُرف به كأحد الفيزيائيين الرياضيين البارزين لأنه وضع جبراً عاماً لا تبديلياً لميكانيك الكم لا علاقة له بمعادلة شرودنغر الموجية ولا بمصفوفات هايزنبرغ وبورن ، ولأنه أيضاً طور نظرية الإلكترون النسبوية ، فأكسبه هذا البحث الأخير نصف جائزة نوبل في الفيزياء للعام 1933 .

وكان ديراك قد حظي ، قبل استلامه منصب نيوتن القديم ، بشهرته الكبيرة بأنه فيزيائي نظري في الكم بفضل أعماله في مجالين مختلفين ، إذ برهن وحده ، كما فعل شرودنغر ، على أن الميكانيك المصفوفي والميكانيك الموجي متكافئان ، كما أنجز أول مرحلة في تطوير التحريك الكهربائي (الإلكتروديناميك) الكمومي بأن أثبت أن نظرية مكسويل الكهرطيسية (معادلات مكسويل في الحقل الكهرطيسي) يمكن وصفها في قالب ميكانيكي كمومي ، أي استكمام الحقل الكهرطيسي ؛ ففي تعبير ديراك عن ميكانيك الكم هناك دالة للمكان والزمان (تسمى دالة الحالة) ، وهي تمثل الحالة الفيزيائية لأي جسيم أو أي منظومة جسيمات ، وهي تحوي كل المعلومات التي يمكن أن يحصل عليها المرء من رصد المنظومة ، وكل ملاحظة (كملاحظة وضع إلكترون أو اندفاعه) هي عملية فيزيائية يمثلها مؤثر رياضي يُطبَّق على دالة الحالة ، ولكن هذه المؤثرات تخضع لضرب لا تبديلي ؛ والحقيقة أن دالة الحالة في الميكانيك الموجي هي دالة شرودنغر الموجية ، أما في الميكانيك المصفوفي فهي مصفوفة .

وقد عامل ديراك الحقل الكهرطيسي معاملة مجموعة من الهزازات ، لأن سلوك كل واحد منها

كان من الوجهة الميكانيكية الكمومية معروفاً معرفة جيدة ، ويمثّل كل واحد منها فوتوناً ، فأحَل ديراك بهذه الطريقة الهزازات الميكانيكية الكمومية محل الحقل الكهرطيسي المكسويلي التقليدي ، وأصبح كل هزاز يخضع لمعادلة شرودنغر الموجية الخاصة به ، فكان هذا التقدم إعلاناً ببداية ما يدعى اليوم « نظرية الحقل الكمومية » التي يستخدمها بكثرة ، في هذه الأيام ، فيزيائيو الجسيمات العالية الطاقة ؛ فأحل ديراك بذلك كميات منفصلة (الهزازات) محل الكميات المتصلة (أي شدتيْ الحقليْن الكهربائي والمغنطيسي) التي أصبح من الصعب استعمالها في ميكانيك الكم .

وعندما أصبحت إسهامات ديراك في ميكانيك الكم معترفاً بها عالمياً في عام 1927 ، بدأ هذا ، وفقاً لما نوه به إلى نيلزبور ، « يحاول الحصول على نظرية نسبوية للإلكترون »معترفاً بأن المعادلة الموجية النسبوية التي حصل عليها شرودنغر وفيزيائيون آخرون ليست بالمعادلة التي تُرضي ، لأنها تعطي احتمالات سالبة ، فهي لذلك لا تصح لتحديد موضع الإلكترون في أي منطقة معينة من الفضاء . وكان ديراك يرى أن الصعوبة ناشئة عن أن علاقة أينشتاين بين الطاقة والاندفاع ، التي يجب أن يبدأ البحث منها ، تربط مربع الطاقة بمربع الاندفاع بدلاً من أن تربط الطاقة بالاندفاع ، في حين أن الميكانيك الموجي يتطلب استخدام الطاقة لا مربّعها في تركيب المعادلة الموجية ، لذلك كان على ديراك أن يأخذ الجذر التربيعي لعبارة الطاقة عند أينشتاين ، وهذا ما فعله بطريقة عبقرية أدت به إلى ما كان يريد بالتحديد.(ولكن ذلك تم) مع بعض الثمن ، إذ إن طريقته في الحصول على الطاقة والعمل بها بدلاً من مربعها أدخل تعقيدات غير متوقعة ، فقد حل محل معادلة شرودنغر التموجية اللانسبوية في حالة الإلكترون أربع معادلات مختلفة . غير أن طريقة ديراك كلها ومعادلاته الأربع لم يستسغها هايزنبرغ وباولي حتى أنهما رفضا الفكرة في البدء كلياً ، ولم يقبلا بها إلا على مضض . وبعد أن أعطت حلول معادلات ديراك الأربع نتائج تتعلق بديناميك الذرة (كخطوط الطيف وأمور أخرى) تفوق بصورة واضحة تلك التي أعطتها المعادلة اللانسبوية . وكان دافعهم الأساسي إلى ذلك هو أن « معادلة ديراك » (أو في الحقيقة المعادلات الأربع) تعطي الإلكترون ما كان قد اقترحه بالتحديد غودشميت وأولنبك ، أي تعطيه اسبيناً ، وهذا ما لم تفعله معادلة شرودنغر ، ولكن باولي كان لا يزال معارضاً لمعادلة ديراك لأن فيها ، بالإضافة إلى السبين الذي أضْفته على الإلكترون ، شيئاً بدا لأول وهلة صفة غير مرغوبة ، وهي أنها تتنبأ بوجود إلكترونات طاقتها سالبة .

ولكن قبل أن نبين كيف ظهرت هذه النتيجة وكيف فسّر ديراك طاقة الإلكترونات السالبة كي يجعلها مقبولة لدى معاصريه ، دعونا نلاحظ أن فكرة الطاقات السالبة موجودة في نظرية النسبية الخاصة ، ففيها أن مربع طاقة الجسيم مرتبط بمربع اندفاعه مضافاً إليه كتلته ، لذلك يجب أن نحسب جذور هذا المجموع لكي نحصل على طاقته نفسها ، ولكن الجذر التربيعي لكميةٍ ما يمكن أن يكون موجباً أو سالباً ، لذلك فإن فكرة الطاقة السالبة متأصلة في نظرية النسبية الخاصة ولكنها

كانت مهملة لا غير قبل أن يُكتشف ميكانيك الكم، أما في ميكانيك الكم فلا يمكن إهمالها، لأن هذا الميكانيك يتنبأ بأنه إذا وجدت حالات طاقة سالبة، فإن الإلكترونات ستقفز هابطة لتملأها (إلا إذا منعت عن ذلك) وعندئذ ستختفي المادة كلها في الحالات السالبة في انفجار هائل مخلفةً وراءها عالماً مليئاً بالإشعاع. ولما كان ذلك لم يحدث،فلا بد أن ثمة آلية (ميكانيكية) منعت كارثة كهذه، وهذه الآلية هي التي افترضها ديراك، فقد اقترح أن لكل حالةِ طاقة سالبة في الخلاء إلكترون واحد منذ البدء (إلكترون ذو طاقة سالبة) يملؤها، ولا يمكن أن تتسع لإلكترون آخر بحسب مبدأ باولي في الانتفاء، لذلك فإن هذا المبدأ هو الذي يجنِّب مادة العالم كلها الفناءَ في لانهائية حالات الطاقة السالبة في الخلاء، فالخلاء ليس فارغاً بل إنه مملوء إلى أقصى الحدود (معبأ كلياً) بجسيمات طاقتها سالبة لا يمكننا الكشف عنها، لا لشيء إلا لأن طاقاتها سالبة.

وهكذا يتضح الآن، لماذا خصت معادلة ديراك الموجية النسبويُة الإلكترونَ المتحرك بأربع معادلات، فالإلكترون يمكن أن يكون في حالة طاقة موجبة أو سالبة (مما يتطلب معادلتين)، ويمكن أن يدور حول محور سبينه شَزراً (باتجاه عقارب الساعة) أو بتّاً (بعكس عقارب الساعة) مما يتطلب أيضاً معادلتين (معادلة لكل حالة دوران)، الأمر الذي يفسر المعادلات الأربع التي استنتجها ديراك من نظرية النسبية. ومع أن مفهوم حالات الطاقة السالبة كان مزعجاً في بادئ الأمر وبدا أنه خلل أو عيب واضح في النظرية، فقد أخذ قبوله ينتشر بالتدريج لأنه تنبأ بسبين الإلكترون وبيَّن الخواص المغنطيسية الصحيحة للإلكترون (أي يتصرف مثل مغنطيس بالغ الصغر).

ثم سرعان ما ثبت أن حالات الطاقة السالبة هي سند عظيم للنظرية لأنها أدت بعد تحليلات ديراك إلى تنبؤ رائع، فقد أثبت ديراك أنه لو امتص إلكترونٌ طاقتهُ سالبة فوتوناً له طاقة كافية (تعادل على الأقل مثلَيْ كتلة الإلكترون) لأصبح هذا الإلكترون موجب الطاقة وخلَّفَ وراءه ثقباً في الخلاء، فهذا الثقب لا بد أن يتصرف بسبب غياب شحنته السالبة وطاقته السالبة مثل إلكترون شحنته موجبة وطاقته موجبة، ولذلك دُعيت هذه النظرية «نظرية الثقوب عند ديراك» وكانت عند اكتشافها مجرد شيءٍ تخيلي غريبٍ إلى أن اكتشف كارل أندرسون في الأشعة الكونية إلكترونات موجبة من هذا القبيل سماها «بوزترونات» وهي التي دعيت أيضاً الجسيمات المضادة (ضديدات) للإلكترونات وهي فعلاً ثقوب ديراك لأنه عندما يتلاقى الإلكترون والبوزترون يختفي الإلكترون في الثقب ويختفي الثقب أيضاً لأن الإلكترون ملأه، وهكذا يُفني الإلكترون والبوزترون أحدهما الآخر مما يصح معه أن يقال أن كلاً منهما ضديد الآخر: وكان تحقق هذا الحادث مثالاً رائعاً على قدرة البحث النظرية على التنبؤ.

وما أن تم التسليم بنظرية ديراك في الإلكترون حتى بدأ الميكانيك الموجي ينفذ إلى كل مجالات الفيزياء والكيمياء على حد سواء، وكان الفيزيائيون والكيميائيون قد بدؤوا، حتى من دون نظرية

ديراك، بتطبيق معادلة شرودنغر على الديناميك الجزيئي، فدرسوا مختلف الروابط الجزيئية (الروابط الإيونية والروابط المتجانسة الأقطاب) وفسروها تفسيراً مقنعاً، كما استنتجت أيضاً بوساطة الميكانيك الموجي خواص الذرات الكيمياوية التي من هذا القبيل مثل تكافئها، كما أدى تطبيق الميكانيك الموجي على مجموعات الجسيمات، كجزيئات غازٍ مثلاً، إلى اكتشاف بعض الخواص التناظرية الهامة في دالة موجة مجموعةٍ كهذه فيما يتصل بخواص جسيماتها الإحصائية. وكان أول اكتشاف مهم هو أن إحصائيات المجموعة يجب أن تصمم بطريقة تجعل المبادلة بين جسيمين متطابقين (ذرتين أو إلكترونين أو جزيئين) لا تؤدي إلى أي اختلاف في النتائج المستنبطة من الإحصائيات، وهذا ما يختلف عن الإحصاء التقليدي الذي يفترض أن المرء يستطيع أن يميز بين جسيمين متطابقين. وأما الخاصة التناظرية الثانية في دالة الموجة، التي لها أثرها في الإحصاء الكمومي، فتنشأ عن المبادلة الجبرية في دالة الموجة عندما يتم التبادل بين جسيمين متطابقين في المجموعة، إذ لما كانت هذه المبادلة (أي المبادلة بين جسيمين متماثلين) لا يمكن كشفها في ميكانيك الكم، فإن هذا التبادل يمكن أن يغير إشارة دالة الموجة من موجبة إلى سالبة أو بالعكس من دون أن يؤثر ذلك في ديناميك المجموعة. والسبب في ذلك هو أن دالة الموجة نفسها ليست العامل الحاسم في الديناميك بل إن العامل الحقيقي هو جداء دالة الموجة في الدالة المزاوجة عقدياً، وهذا الجداء لن يختلف سواء أكانت دالة الموجة موجبة أو سالبة.

ولكن الإحصاء الذي يجب أن يطبقه المرء على مجموعةٍ ما، يتوقف على هذه المجموعة نفسها: هل تتبدل إشارة دالتها الموجية عند المبادلة بين جسيمين متماثلين أم أنها لا تتبدل. فإذا كانت إشارتها لا تتبدل فإنه يقال عندئذ عن دالتها إنها تناظرية، أما إذا كانت إشارتها تتبدل فيقال عندئذ عن دالتها إنها تخالفية. وترجع أهمية هذا النوع من التناظر بالإضافة إلى علاقته بنوع الإحصاء الذي يجب أن يستعمل في دراسة مجموعة من الجسيمات المتطابقة (كمجموعة إلكترونات مثلاً) إلى أن دوال الموجة التخالفية (أي تلك التي تتبدل إشارتها) يجب استخدامها لوصف مجموعة الجسيمات التي تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء، في حين يجب استخدام دوال الموجة التناظرية لوصف الجسيمات التي لا تخضع لمبدأ الانتفاء.

وثمة خاصة فيزيائية أخرى مهمة في الجسيمات مرتبطة بتناظر دالة الموجة وهي سبينها. ويقدر السبين في الطبيعة بوحدة أساسية هي حاصل قسمة ثابت بلانك h على 2π أي $\frac{h}{2\pi}$ التي تكتب $\hbar$. وتصنف الجسيمات الأساسية في الطبيعة (كالإلكترونات مثلاً) في إحدى فئتين: فئة الجسيمات التي يساوي سبينها نصف عدد فردي ($\frac{\hbar}{2}$، $\frac{3\hbar}{2}$) من الوحدة المذكورة وفئة الجسيمات التي يساوي سبينها صفراً أو عدداً صحيحاً ($0, \hbar, 2\hbar ...$) فالجسيمات التي يساوي سبينها نصف عدد فردي كالإلكترونات والبروتونات تسمى «فِرميونات fermions» (نسبة إلى

الفيزيائي الإيطالي العظيم إنريكو فِرمي E.Fermi) ، وهي جسيمات توصف بمعادلة موجة تخالفية لأنها تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء. أما الجسيمات التي يساوي سبينها صفراً أو عدداً صحيحاً كالفوتونات فتوصف بمعادلة موجة تناظرية لأنها لا تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء، وتسمى «بوزونات» (نسبة إلى الفيزيائي الهندي السير جاغاديس تشاندرا بوز J.Ch.Bose). لذلك لا يصلح أن نأخذ في حسابنا عند النظر في الخواص التناظرية لدالة الموجة وضع الجسيمات (أي إحداثياتها المكانية) فحسب، بل يجب أن نراعي أيضاً سبيناتها؛ ذلك لأن مبادلة أي جسيمين في مجموعةٍ ما لا يعني فحسب مبادلة وضعيهما بل يعني أيضاً مبادلة سبينهما. وكان فِرمي هو الذي اكتشف العلاقة بين سبينات الجسيمات ونوعية إحصائها في حال الجسيمات التي يساوي سبينها $\frac{1}{2}$ وحدة؛ أما بوز فقد اكتشف هذه العلاقة في الجسيمات التي يساوي سبينها صفراً أو 1؛ ولذلك تَرانا نتحدث عن الفرميونات التي تخضع لإحصاء فِرمي وعن البوزونات التي تخضع لإحصاء بوز. ولما كانت الإلكترونات تخضع لإحصاء فِرمي، لذلك فإن الكثير من ظواهر عالمنا اليومي، التي تقوم فيها الإلكترونات بدور حيوي، هي ظواهر تخضع لإحصاء فرمي. من ذلك مثلاً أن ناقلية المعادن للكهرباء والناقلية الفائقة، وظواهر أخرى عديدة في فيزياء الأجسام الصلبة تخضع كلها لإحصاء فِرمي.

ويقوم هذا الإحصاء بدورٍ مهم في بنية بعض النجوم كالشمس حين تقترب من نهاية تطورها عندما تصبح أقزاماً بيضاء، وكذلك في بنية النجوم النترونية (النباضات pulsars)، إذ إن ما يحفظ الأقزام البيضاء في حالة توازن ويمنعها من الانهيار الثقالي هو ضغط إلكتروناتها الحرة إلى الخارج، وذلك وفقاً لإحصاء فرمي؛ كما تقوم النترونات الحرة التي تخضع أيضاً لإحصاء فرمي بدور مماثل في النجوم النترونية. أما بوز فقد أثبت أن الفوتونات الحرة الموجودة في حاوٍ (أي غاز من الفوتونات) لا تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء وأنها لا توصف بدالة موجة تناظرية لأن سبين الفوتون يساوي وحدة سبين واحدة ($\hbar$) فهي لذلك تخضع لإحصاء بوز الذي استنتج منه بوز صيغة بلانك نفسها في الإشعاع. كما أن نوى الهليوم 4 (أي الهليوم العادي) يساوي سبينها الصفر، فهي لذلك تخضع لإحصاء بوز، ومن إحصائها هذا تنشأ جميع الخواص الرائعة التي يتمتع بها الهليوم عندما تكون درجة حرارته قريبة من الصفر المطلق.

الإلكتروديناميك الكمومي

عندما نجح الفيزيائيون هذا النجاح العظيم في تطبيق ميكانيك الكم على الديناميك الذري بدؤوا يعالجون أيضاً الحقل الكهرطيسي وتفاعلاته مع الجسيمات المشحونة بطريقة ميكانيكية كمومية، ثم أُطلق على هذا المجال الواسع العام من الفيزياء اسم «الإلكتروديناميك الكمومي»، لأنه

يدخل في صميم العلاقة بين المادة (الإلكترونات مثلاً) والطاقة الصرفة (الإشعاع أو الفوتونات)؛ ويتألف من الميكانيك الكمومي لحقل الإشعاع (أي الشكل الكمومي لمعادلات مكسويل الكهرطيسية) ومن الميكانيك الكمومي لتفاعل الجسيمات (الإلكترونات مثلاً) مع الحقل الكهرطيسي. وكان ديراك أول من بدأ العمل في هذا الفرع من الميكانيك الكمومي في عام 1927 ثم تبعه هايزنبرغ وباولي، ولكن معالجة فرمي كانت أبسط المعالجات ومباشرة إلى حد بعيد.

أما ميكانيك حقل الإشعاع الكمومي فهو واضح بسيط يسهل جداً فهمه وإدراكه، إذ يمثَّل الحقل بمجموعة هزازات توافقية في حالات مثارة مختلفة، مما يمكّنها من إصدار فوتونات وامتصاصها مغيّرة بذلك حالات حقل الإشعاع التي تُصوَّر بأنها خلق فوتونات أو إفناؤها بوساطة الهزازات.

وأما الصعوبة في الإلكتروديناميك الكمومي فتبرز في المسائل التي تتضمن تفاعل جسيمات مشحونة (إلكترونات مثلاً) مع حقل كهرطيسي، وهي مسائل كانت سهلة جداً في الإلكتروديناميك التقليدي، إلا أنها معقدة في الإلكتروديناميك الكمومي، لأن المرء لا يستطيع أن يحل بدقة معادلة موجة الحقل المتفاعل مع الشحنة الكهربائية بل عليه، بدلاً من ذلك، أن يستخدم طريقة مضطربة (أي سلسلة تقريبات متتالية) يزداد فيها باستمرار تعقيد مظهر الحدود كلما انتقل المرء إلى تقريب أعلى. ويرجع هذا التعقيد إلى أن تفاعل الشحنة مع الحقل يُفسَّر بأنه ناشىء عن أن الشحنة تصدر فوتونات افتراضية وتمتصها. ولكن الفوتون الافتراضي لا يمكن ملاحظة وجوده بل يظهر ويُمتص في وقت قصير جداً هو ما يسمح به مبدأ الارتياب من دون الإخلال بانحفاظ الطاقة. فمثلاً، تتفاعل شحنتان بأن تتقاذفا فوتونات فيما بينهما، كذلك تتفاعل شحنة مع حقلها الكهرطيسي بإصدار عدد لا نهائي من الفوتونات الافتراضية ثم امتصاصها. ويتضمن حساب التفاعلات الكهرطيسية إصدار عددٍ لا نهائي من الفوتونات الافتراضية وامتصاصها، لذلك يأتي تعقيد هذا الحساب من أنه يجب أن يتم خطوة فخطوة. وحين تُجرى هذه الحسابات بطريقة نظامية نجد أن عددها قد تعاظم في كل خطوة حتى يصبح لا نهائياً. وقد ظلت مسألة هذه الحسابات اللانهائية مستعصية على الحل إلى أن استطاع ش. توموناغا **Sh.Tomonaga** في اليابان، وبصورة مستقلة ج. شوينغر **J.Schwinger** و رِتْشارد فاينْمان **Richard Feynman** في الولايات المتحدة، بتحرياتهم النظرية، إرجاع هذه الصعوبة إلى الكتلة (الطاقة الذاتية) وإلى شحنةِ الإلكترون الكهربائية؛ إذ لما كانت تفاعلات الإلكترون بوساطة شحنته مع حقله الكهرطيسي تساهم في كتلته، لذلك يجب حساب هذه التفاعلات بتعيين كتلة الإلكترون، ولكن هذه التفاعلات تعطي أجوبة لا نهاية لعددها. وعندما قام شوينغر وفاينمان بتحليل مماثل لتحليل توموناغا أثبتا كيف يمكن إخفاء هذه اللانهائيات بحذفها من الحسابات والحصول أخيراً على نتائج منتهية، ويدعى هذا الفرع من الطرح الفيزيائي «إعادة استنظام **Renormalization** الشحنة والكتلة»، ففي جميع الحسابات

يستبدل المرء بكتلة الإلكترون التجريبية ــ كما لو أن الإلكترون ليس له شحنة ــ كتلتَه النظرية ويهمل تفاعل الشحنة مع الحقل ثم يفعل الشيء نفسه بشحنة الإلكترون بحيث تصبح الشحنة والكتلة معها مجرد عدديْن ليس للمرء أن يهتم بهما بعد ذلك . وقد تبين أن لهذه الطريقة في معظم التجارب التي تتضمن الإلكترونات نتائج نظرية دقيقة دقةً لا تُصدّق .

وقد طور شوينغر نظريته في إعادة الاستنظام باستخدام الطريقة الرياضية التي يحلل فيها خطوة فخطوة تفاعل شحنة الإلكترون مع الحقل الكهرطيسي (حقله أو حقل خارجي) حتى يبلغ أي مرتبة من التقريب ، وتأكد في كل خطوة من أن تحليله يتفق مع نظرية النسبية (أي أنه صامد نسبوياً) . أما فاينمان فقد فعل الشيء نفسه من وجهة إجمالية ولكن من دون استخدام طريقة شوينغر الرياضية المعقدة ، فقد صوَّر جميع التفاعلات الممكنة بين الجسيمات المشحونة (أو بين الجسيم والحقل) بمخططاتٍ (تُعرف بمخططات فاينمان) صوَّرها في زمكان يمثِّل فيه الخط الكوني لجسيم بخط مستقيم ، والخط الكوني لفوتون بخط متموج ، وهكذا يمكن تمثيل جميع التفاعلات الممكنة بمجموعة من الخطوط المستقيمة والمتموجة وتصوُّرها إلى أي درجة نريدها من التقريب باستخدام عدد كافٍ من هذه الخطوط التي هي ، كما ذكرنا ، خطوط كونية في الزمكان ، لذلك تتفق مخططات فاينمان دائماً وتلقائياً مع نظرية النسبية . ثم أكمل فاينمان تمثيله للحوادث الجارية على الإلكترونات والفوتونات (أي تفاعل الشحنات) بأن وضع لكل خط وكل تقاطع بين خطين في المخطط عبارة رياضية محددة يمكن أن تُستنتج منها دالة الموجة على طول هذا الخط . وهكذا يستطيع المرء ، إذا ما ركّب بطريقة ملائمة كل عبارات مجموعةٍ معينة من الحوادث ، أن يتتبّع تطور دالة موجتها من البداية إلى النهاية ، وأن يحسب بالتالي احتمال توالي الحوادث ، ولا يقتصر تطبيق مخططات فاينمان على نوعٍ معيّن من التفاعلات بل يمكن تطبيقها على كل التفاعلات التي تتضمن إصدار جسيمات أو امتصاصها ، لذلك شاع استعمالها في فروع فيزيائية كثيرة مثل النسبية العامة والفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات العالية الطاقة .

ولد رتشارد فيلبْس فاينمان في مدينة نيويورك عام 1918 ، وتلقى تعليمه الأول في مدارس نيويورك العامة ، وقد أظهر موهبته الفائقة في الرياضيات أول ما أظهرها في المدرسة الثانوية حتى أن معلم الفيزياء سمح له ، لإعجابه الشديد بمؤهلاته ، بأن يجلس في القسم الخلفيّ من القاعة وأن يستخدم التحليل العالي ليحل المسائل المعطاة له في حين كان زملاؤه منشغلين باستخدام الأسس الجبرية .

وقد انتسب فاينمان بعد تخرجه من المدرسة الثانوية إلى معهد ماساشوستس Massachusetts للتكنولوجية (MIT) ، الذي قد يكون أشهر جامعة علمية في أمريكة الشمالية ، وهناك باشر بدراسة برنامج قوي في الرياضيات والفيزياء ، وسرعان ما ألم بكل تعقيدات فيزياء الكم ونال شهادته عام 1939 ثم ذهب بعدئذ ، وقد أثارت اهتمامه طبيعة الفيزياء الذرية الاحتمالية ، إلى برنستون بمنحة جامعية ليقوم



رتشارد فيلبس فاينهان (1918 - 1988)

ببحثه الذي يؤهله للدكتوراه مع ج. أ. ويلر J.A.Wheeler الذي كان آنذاك أعلى مرجع في الفيزياء النووية فضلاً عن أنه كان بين فيزيائيي القرن العشرين أكثرهم تنوعاً في الاطلاع، إذ كان يقوم بمساهمات نظرية في دراسة النوى الذرية والثقوب السوداء، لذلك كان خير موجِّهٍ لألمعية فاينهان الذي كان مهتماً بالإلكتروديناميك «وبمسألة التأثير المتبادل الأساسية بين الجسيمات المشحونة وما إذا كان هذا التأثير يعالج أفضل معالجة إذا عُدَّ تأثيراً عن بعد أم إذا عُدَّ تأثير حقل»[7]. وقد أنهى فاينهان برنامج الدكتوراه عام 1942 وانضم إلى الفريق المهاجر نحو الغرب المؤلَّف من عددٍ من أرقى الأدمغة العلمية العاملة في مختبر الحكومة السري في لوس آلاموس حيث قام ببحوث في مشروع منْهاتن.

وقد ظل فاينهان في لوس آلاموس حتى نهاية الحرب، وفي عام 1945 قبِل منصب أستاذ مساعد في جامعة كورنل حيث طور مخططاته التي تحمل اسمه لكي يبرر مختلف العمليات التي تحدث عندما يتبادل أحد الجسيمات المشحونة التأثير مع جسيم آخر[8]. ثم لم تمضِ سوى سنوات قليلة حتى أصبح فاينهان أستاذاً في كورنل وأصبحت أعماله في ميكانيك الكم معروفة جداً بين زملائه. وكانت بحوثه في الإلكتروديناميك الكمومي ومخططاته (التي تعطي صورة واضحة وشاملة

عن سلوك منظومة من الجسيمات بدلاً من محاولة تعقب سلوكها من لحظة إلى أخرى)، وهي المعبر النموذجي عن الجهود التي بذلها لفهم عمليات الطبيعة بطريقة بسيطة قدر الإمكان وبأقل شكلية رياضية.

وقد أدت أعمال فاينمان في الإلكتروديناميك الكمومي (مع أعمال شوينْغر وتوموناغا) «إلى إعادة بناء أسس الإلكتروديناميك الكمومي التي كانت مصحوبة بتقدم عظيم في الدقة التي كان يمكن أن يحسب بها سلوك الإلكترون[9]». وفي عام 1950 غادر فاينمان جامعة كورنل إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا حيث أصبح أستاذاً للفيزياء النظرية وبقي فيه حتى وفاته. وفي مطلع الخمسينيات واصل فاينمان بذل معظم جهوده لشحذ نظريته في الإلكتروديناميك الكمومي وتطوير تقنيات رياضية جديدة، ثم بدأ، بعد أن اقتنع بالبناء النظري الذي كان قد شيده بالجهد الجهيد على مدى العقدين السابقيْن بتطبيق بعض طرائقه، التي كان قد طورها، على الجسيمات الفيزيائية العالية الطاقة. وتعاون مع موري غيلمان Murray Gell-Mann (الذي صاغ نظرية الكواركات) على وضع نظرية مهمة في تفكك جسيمات بيتا؛ وقد قام أيضاً ببحث مهم في فيزياء درجات الحرارة المنخفضة ولا سيما في ظاهرة الناقلية الفائقة، ولكن الاعتراف الحقيقي ببحوث فاينمان المهمة الأساسية ولا سيما نظريته في الإلكتروديناميك الكمومي كان عندما مُنح في عام 1965 بالإشتراك مع توموناغا وشوينغر جائزة نوبل في الفيزياء.

وحين كان يصارع سكرات الموت عام 1988 بعد كفاح طويل مع السرطان، أصبح معروفاً جداً لدى الجمهور بعد أن كتب سيرة حياته «لا شك أنك تمزح يا سيد فاينمان» فكان كتابه هذا من أكثر كتب السيرة رواجاً وقد ذكره قراء مجلة Esquire بأنه أذكى رجل في أمريكا، كما أنه ألف أيضاً عدداً من الكتب ذات الطابع العلمي، ومن أشهرها «محاضرات فاينمان في الفيزياء»*، وهو يقع في ثلاثة مجلدات° ومنها «طبيعة قوانين الفيزياء»**.

والحقيقة أن تقنية إعادة الاستنظام عند شوينغر وفاينمان وتوموناغا لحل مسائل الإلكتروديناميك الكمومي هي طريقة رياضية فحسب وليس فيها فيزياء جديدة لأنها تعتمد على جميع قوانين الفيزياء المعروفة، إلا أن هذا لا يُنقص من جدواها ونجاحها العظيم في إعطاء أجوبة تبلغ في دقتها مرتبة لا تصدق، (ففي بعض الأمثلة تبلغ الدقة جزءاً من مليارات) ولكنها تشير أيضاً إلى خللٍ في ميكانيك الكم، لأنها إذا طُبقت وفق الأصول على الإلكتروديناميك أعطت نتائج لا معنى لها.

---

* نقل المجلد الأول منها إلى العربية بعض أساتذة الفيزياء في جامعة دمشق.

** نقله إلى العربية الدكتور أدهم السمان أستاذ الفيزياء في جامعة دمشق.

ومهما يكن من أمر ، فإن عمل فاينمان وشوينغر وتوموناغا يشير إلى نهاية «عصر الفيزياء الذهبي» الذي شهد انبثاق نظريتين عظيمتين وتطورهما المتألق ، وهما النسبية ونظرية الكم اللتان أنارتا طريقنا في بحثنا عن فهم الطبيعة وإدراكها .

الفيزياء النووية

«أُثر عن القدماء قولهم «إن الحقيقة ترقد في بئر» فلنا إذاً أن نقول، إذا سايرنا هذه الاستعارة، إن المنطق يزوّدنا بدرجاتٍ نستطيع استخدامها للوصول إلى الماء».

ـ إسحق وات*

يمكن أن يُعرض تطور الفيزياء على فصول متلاحقة تتدرج من مجال تفاعلات الطاقة المنخفضة إلى مجال الطاقات المتزايدة باستمرار، فقد عالجت فيزياء نيوتن في البدء مناطق الفضاء الشاسعة (بين الكواكب مثلاً أو بين النجوم وبين المجرات) حيث تسود التفاعلات الثقالية الضعيفة نسبياً؛ وفي المرتبة التالية دخلت الفيزياء المجال الجزيئي (قانون الغازات مثلاً) حيث الطاقات، التي تربط الجزيئات أحدها بالآخر لتكوِّن جسماً صلباً، تفوق طاقات الثقالة التي تربط بينها بمراتب كبيرة (بمرتبة قوى العشرة). أما القوى التي تعمل في هذا المجال ــ مجال الكيمياء والكيميائيين ــ والتي تدعى «قوى فان درفالس» فهي صورة معقدة من القوى الكهرطيسية، وتصنف بوجه عام ضمن القوى السابقة التي تربط الجزيئات، كما ساق اكتشاف الإلكترون والبروتون الفيزياء نحو العالم الذري ونواها فأصبح واضحاً أن هذا التطور يمثل مسيرة نحو الفضاءات المتناقصة الأبعاد باستمرار والتي يرافقها تزايد في طاقات التفاعل إذ تتعاظم طاقة هذه التفاعلات كلما ضاق الحيز الذي تجري فيه.

كما يمكن أن ننظر إلى هذا التسلسل لطاقات التفاعل من وجهة نظر مختلفة ناشئة عن مفهوم

* Isaac Watts (1674-1748) قس إنكليزي كاتب، له بضع مئات من التراتيل الدينية المقدسة التي تضمنت التعاليم الصارمة للمذهب الكاليفاني Calivinism.

طاقة الترابط في البنية وهي الطاقة اللازمة لفصل الجسيمات بعضها عن بعض كالإلكترونات أو البروتونات أو الذرات أو الجزيئات التي تؤلف البنية ؛ ويمكن القول بوجه عام إنه كلما صغرت البنية كبرت متانة الرابطة فيها وتعاظمت طاقتها ، فما نحتاجه من الطاقة مثلاً لفصل إلكترون عن الأرض (أي لمقاومة طاقة الارتباط الثقالية) هي أصغر بكثير مما نحتاجه لفصله عن الجزيء أو عن الذرة .

ولم يكن من الممكن ، بسبب هذه العلاقة بين حجم البنية وطاقة ارتباطها ، دراسة بنيتي الجزيء والذرة تجريبياً بقذفهما بجسيمات ذات طاقة كافية (كالفوتونات مثلاً أو الإلكترونات) ، أو بجعلهما يصطدمان اصطداماً تكون شدته كافية للحصول على استجابة ملحوظة . إلا أن الفيزيائيين طوروا طرائق لتسريع الجسيمات المشحونة تسريعاً كافياً. فقد حُلت هذه المسألة بتطوير التقانة الكهرطيسية ولا سيما الأنابيب المفرّغة ، غير أن هذه الطاقات لم تكن كافية لسبْر نواة الذرة ، نظراً لأن النواة أصغر من الذرة بكثير . ويكفي لتوضيح هذا الأمر أن نُلقي نظرة سريعة على الطاقات المستخدمة في مختلف مجالات بنى المادة (بنية الذرة) ، حيث يتخذ الإلكترون فلط (eV) وحدةً للطاقة ، وهو يساوي تقريباً تريليون (10^{12}) إرغة ؛ والإرغة هي الطاقة الحركية لجسم كتلته غرامان يسير بسرعة 1 سنتمتر في الثانية ، ويكتسب الإلكترون طاقة مقدارها إلكترون فلط عندما ينتقل في الخلاء ، بادئاً من السكون ، من لبوس المكثفة السالب إلى لبوسها الموجب حين يكون فرق الكمون بينهما فلطاً واحداً ، وهذا هو سبب تسمية هذه الطاقة إلكترون فلط .

إن الطاقة التي تربط الجزيئات مثلاً هي من مرتبة عددٍ قليل من الإلكترون فلط ، وهذا ما تدل عليه سهولة تحطيم هذه الجزيئات أو فصلها . فالإلكترون يرتبط بالبروتون في ذرة الهدروجين مثلاً بما يقرب من 14eV ، كما ترتبط إلكترونات ذرة الهليوم بنواتها بما يقرب من 50eV . وهكذا فإن الطاقات العاملة في الفيزياء الجزيئية والذرية هي ، على الأكثر ، من مرتبة بضع مئات الإلكترون فلط .

وقبل أن ندرس نواة الذرة وطاقة ارتباطها دعونا نستعرض أيضاً سلسلة من الأعداد المتعلقة بمراتب الطاقة لكي تزداد فكرة الإلكترون فلط وضوحاً في ضوء المفاهيم الفيزيائية الأخرى ؛ فإذا كان متوسط طاقة الجزيئات الحركية مثلاً في أحد الغازات 1eV ، كانت درجة حرارته المطلقة 5000k° (كلفن) ، وفي هذا ما يربط الإلكترون فلط بدرجة الحرارة . وإذا تحولت كتلة الإلكترون كلها إلى طاقة ، فإنها تساوي 0,5 مليون (ميغا M) إلكترون فلط ، أو تكتب 95MeV . وإذا تحولت كتلة البروتون كلها إلى طاقة فإن ما يتولد منها عندئذ هو نحو مليار (جيغا G) إلكترون فلط ، أو تكتب 1GeV . وكثيراً ما تُستخدم هاتان الوحدتان GeV وMeV في الفيزياء النووية وفي فيزياء الجسيمات العالية الطاقة .

ومع أن تطور الفيزياء النووية في ثلاثينيات وأربعينيات هذا القرن كان أعظم ما شهدته من

تطور ، فإنها بدأت في حقيقة الأمر مع اكتشاف النشاط الإشعاعي ، إذ إنه من طاقة الجسيمات ألفا α وبيتا β وغاما γ القوية جداً ، الصادرة عن النوى الناشطة إشعاعياً ، اتضح أن هذه الجسيمات لا يمكن أن تصدر عن مناطق خارجية منخفضة الطاقة بل لا بد أنها ناشئة عن النوى المتماسكة بشدة . ولكن دارسي هذه الجسيمات الأوائل ، ولا سيما رذرفورد والزوجان كوري ، لم يكشفوا الكثير عن بنية النواة ، ولم يكن مفهوم الذرة النووية محبذاً في حقيقة الأمر في تلك الأيام الأولى ، إذ إن جوزيف تومسون ، مكتشف الإلكترون ورئيس مختبر كافندش في كمبردج ، كان قد اقترح نموذجاً للذرة على هيئة « فالوذج الزبيب » تتوزع فيه شحنة الذرة الموجبة بانتظام على حجم الذرة ، أما الشحنات السالبة (الإلكترونات) فإنها نقاط متمايزة داخل الشحنة الموجبة ؛ وقد ظلت الأمور على هذا النحو إلى أن أتت تجارب رذرفورد الحاسمة التي قذف فيها جسيمات ألفا (أي الجسيمات الموجبة الشحنة الصادرة عن الأرانيوم المشع) على شرائط من صفائح الذهب الرقيقة ، فلاحظ أن طريقة تبعثر جسيمات ألفا (أو طريقة ارتدادها) على ذرات الذهب تشير بوضوح إلى أنها كانت تصطدم اصطداماً عنيفاً بشحنة موجبة عالية التركيز موجودة داخل ذرات الذهب ، فتولد على هذا النحو مفهوم الذرة النووية، وإن كان قد طَرح على الفيزيائيين آنذاك ما بدا أنه مسائل لا حل لها .

وقبل أن نستعرض هذه المسائل وكيف تم حلها ، دعونا ندخل عددين هامين يميزان النواة ويساعداننا على وصفها، وهما الوزن الذري A والعدد الذري Z . إذ إن كيميائيي القرن التاسع عشر كانوا قد وجدوا عندما بدؤوا بدراسة الخواص الكيمياوية للعناصر المعروفة أنه من المناسب أن يخصوها بكتل (أو أوزان ذرية) تقاس بنسبتها إلى أصغر عنصر (أو ذرة) يُعد هو الوحدة التي لا تتجزأ . ولما كان الهدورجين هو أخف العناصر ، لذلك كان من الطبيعي أن يعزو الكيميائيون إليه الوزن الذري 1 ، وقد اكتشفوا أن الأوزان الذرية للعناصر الأخرى ، اعتماداً على سلّم قياس الكتل هذا ، تساوي تقريباً أعداداً صحيحة . وهكذا استدل الكيميائيون ، ولا سيما وليم بروت **W.Prout** أن الهدروجين هو اللبنة الأولى في بناء جميع العناصر ، لأن العناصر الأخرى هي « مضاعفات الهدروجين » . وقد لا يكون لهذه الفكرة المحددة تحديداً ضعيفاً معنى عندما تطبق على الذرات بأكملها ولكنها ذات معنى مهم لنوى الذرات ، لأنه إذا كان الوزن الذري هو كتلة نواة الذرة على أساس سلّم قياس يقوم على أن كتلة البروتون (أي نواة ذرة الهدروجين) هي 1 ، فإن كتل النوى تقرب جداً من أعداد صحيحة نظراً لأنها تتألف من بروتونات لا تنقسم . والآن ، يمكننا أن نرجىء التفكير في المسألة المتعلقة بعدد البروتونات في النواة وننظر في العدد الذري Z .

لم يكن هذا العدد معرّفاً بوضوح قبل أن يكتشف ديمتري مندلييف الجدول الدوري للعناصر الكيمياوية . فإذا كانت هذه العناصر مرتبة في هذا الجدول ترتيبَ الأوزان الذرية المتزايدة فإن العدد الذري للذرة يصبح عندئذ رقمَ ترتيبه في هذا الجدول . ولقد أدت هذه الملاحظة إلى

الاكتشاف الهام، وهو أن العدد الذري للذرة يساوي تقريباً نصف وزنها الذري، وهذا ما يدلنا على شيءٍ مهم عن نواة الذرة لا عن الذرة نفسها، وهو أن العدد الذري هو عدد الشحنات الموجبة كلها في نواة الذرة، وهو يساوي بالتالي عدد الإلكترونات في الذرة الحيادية كهربائياً (أي غير المتأينة).
كما أن العدد الذري وليس الوزن الذري ـــ هو الذي يحدد خواص الذرة الكيمياوية. كذلك يقود هذا الاكتشاف إلى اكتشاف آخر مهم هو وجود عناصر متماثلة في الخواص الكيمياوية ولها العدد الذري نفسه ولكن أوزانها الذرية مختلفة. وتسمى عناصر كهذه «نظائر». وكان أول من اكتشفها هو فريدريك سودي في عام 1911. وتبين بعدئذ من دراسة نوى الذرات أنه يمكن أن توجد لجميع العناصر نظائر مختلفة.

ولقد طَرَحت خواص النوى الذرية هذه، التي كشفت عنها البحوث والاكتشافات المبكرة، على الفيزيائيين مسائل مهمة هي: 1- تعيين حجم النواة الذي استُدِل من الحقائق كافةً على أنه أصغر من الذرة كاملة بآلاف المرات. 2- تعيين مكونات النواة إذ لا يمكن أن تكون بروتونات فحسب، لأن الشحنة النووية الموجبة تصبح عندئذ أكبر من ضعفي قيمتها المقيسة. 3- تحديد طبيعة القوة النووية (أي القوة التي تُبقي الجسيمات المكّونة للنواة متماسكة داخلها)، فقد استُدل من طاقات الجسيمات ألفا وبيتا المنبعثة عن تفكك العناصر الثقيلة المشع (كالأرانيوم)، وكذلك من طريقة تبعثر أشعة ألفا عن النوى الثقيلة، بأن قطر النواة هو في غاية الصغر، فهو من رتبة عُشر الواحد من تريليون من السنتيمتر (10^{-13} سم). فمن هذا الواقع المرصود نستنتج أن الطاقة التي تربط الجسيم النووي بالنواة تقرب من مليون ضعف الطاقةَ التي تربط الإلكترون بالذرة. وسرعان ما طرحت هذه النتيجة المسألة التالية: كيف يمكن للبروتونات، وهي جميعاً ذات شحنة واحدة، أن تبقى متجاورة في منطقة صغيرة صغر حجم الذرة؟ إن قوة التنافر الكهراكدية بين بروتونين تفصل بينهما أبعاد كأبعاد النواة هي من الشدة بما يجعل هذه النواة تنفجر، فكيف إذاً تظل هذه النواة متماسكة إذا لم تكن ثمة قوة مجهولة شديدة جداً تمنعها من الانفجار، تلك هي مشكلة استقرار النواة التي ظلت هي المسألة الرئيسية التي تشغل ذهن معظم الفيزيائيين منذ السنوات الأُولى من القرن العشرين وحتى عقده الثالث.

والحقيقة أن مشكلة استقرار النواة مرتبطة ارتباطاً شديداً بطبيعة جزيئات أخرى، غير البروتونات، موجودة في النواة. فكان خيرة الفيزيائيين تقريباً في تلك السنوات الأُولى يتمعنون في هذه المسألة. وكان التخمين الأكثر وضوحاً والذي خطر في بال الكثير منهم هو أن النواة تحوي بالإضافة إلى البروتونات إلكترونات أخرى، أي إلكترون لكل بروتون زيادة عما يدل عليه العدد الذري، وقد بدا أن هذا الظن مؤكد بثبوت أن أشعة بيتا هي إلكترونات، الأمر الذي اتُّخذ حجة قوية جداً على وجود الإلكترونات في النواة، إذ كانوا يحاجون بأنه إذا كانت الإلكترونات تنبعث من النواة فلا بد أن

تكون موجودة فيها لتنطلق منها . وكانت هذه الدعوى « البينة بذاتها » مقبولة بوجه عام ، حتى عند رذرفورد الذي ظل يدعمها حتى بداية الثلاثينيات .

ثم أصبح افتراض وجود إلكترونات في النواة ، بعد تطور ميكانيك الكم واكتشاف علاقات الارتياب ، أمراً غير مقبول إطلاقاً، لعددٍ من الأسباب المقنعة ، أولها مثلاً ، أنه لو فرض وجود الإلكترون في النواة لأصبح اندفاعه في منطقة بهذا الضيق ضخماً إلى حد بعيد بسبب مبدأ الارتياب بحيث لا يمكن أن يبقى حبيساً في النواة ، ولتجاوزت طاقته الحركية كثيراً طاقات الارتباط النووية . ومن جهة أخرى ، إذا لم تكن سرعة الإلكترون قريبة من سرعة الضوء ، فإن طول موجته يكون من الكبر بحيث يمكن أن تمتد موجته إلى أبعد بكثير من أبعاد النواة ؛ ولكن من الواضح أن التجاذب الكهراكدي بين الإلكترونات والبروتونات تكاد شدته لا تكون كافية لمنع انفجارها ، فلا بد إذاً من وجود قوة تجاذبٍ شديدة بين الجسيمات في النواة لكي تكون مستقرة هذا الاستقرار المدهش . كذلك فإن وجود الإلكترونات داخل النواة قد يعطي سبينها قيماً مغلوطة ، إذ لو وجد في النواة بروتونات وإلكترونات معاً ــ وكل منها يساوي سبينه $\frac{\hbar}{2}$ كما نعلم (حيث $\hbar$ وحدة السبين) ، لأصبح سبين النواة الكلي يساوي عدداً فردياً من نصف وحدة السبين فيما إذا كان مجموع الإلكترونات والبروتونات عدداً فردياً ولأصبح يساوي عدداً زوجياً في الحالة الأخرى ، وهذا ما لا يتفق مع سبينات بعض المواد التي سبق أن قيس سبين بعضها منذ عام 1926 ؛ فأحد نظائر الآزوت ــ14 وهو آزوت عادي) ، إذا حوت نواته 14 بروتوناً و7 إلكترونات (وهو ما يلزم لجعل عدده الذري 7) ، فإن سبينه يجب أن يكون عدداً فردياً من $\frac{1}{2}$ وحدة السبين ، ولكن وجد بالقياس أن سبينه يساوي وحدة السبين (أي نصفي الوحدة) .

وهكذا أقنعت هذه الحجج كلها الفيزيائيين أنه لا وجود لإلكترونات حرة في النواة ، واستُبعد بذلك نموذجُ النواة إلكترون ــ بروتون . غير أن رذرفورد لم يستبعد هذه الفكرة نهائياً بل استبدل بها فكرة إلكترونات مرتبطة ، وألح على أن الإلكترون والبروتون يمكن أن يكوّنا في ظروف مواتية بنيةً شديدة الترابط تكون أصغر بكثير من ذرة الهدروجين ؛ وكان يرى أن هذه البنية الحيادية التي دعاها « نتروناً » هي بنية أساسية لبناء نوى العناصر الثقيلة ، كما كان مقتنعاً بأن البحث الدؤوب في الذرات الثقيلة ، التي تكون إلكتروناتها الداخلية قريبة جداً من النواة ، لا بد أن يكشف هذه النترونات ؛ والحقيقة أن البحث عن نترون رذرفورد بدأبه ج . شادويك J.Chadwick منذ عام 1924 ، وكان هذا زميلاً حميماً لرذرفورد ويشاركه في العمل ، ولكنه قضى في بحثه ثماني سنوات كانت عديمة الجدوى لأنه كان يبحث عن شيء لا وجود له ، وهو أن يأسر أحدُ بروتونات النواة أحدَ الإلكترونات فينقص بذلك العدد الذري بمقدار 1 ، غير أن شادويك اكتشف أنه إذا قذف البريليوم ــ9 (^{9}Be) بجسيمات ألفا (المنبعثة من البولونيوم المشع) تولدت نواة الكربون ــ12 (^{12}C) مع إطلاق جسيمات

حيادية نشيطة جداً رأى شادويك أنها هي نترونات رذرفورد التي لها بنية التركيب بروتون ـــ إلكترون. ومع تطور فيزياء النترونات السريع جداً، أصبح واضحاً أن جسيمات شادويك الحيادية هي النترونات التي تُعرف اليوم بأنها المكوِّن الحيادي كهربائياً للنواة، وكتلتها تفوق كتلة البروتون بمقدار طفيف،ويساوي سبينها $\frac{1}{2}$ وحدة السبين، فهي المثيل الحيادي للبروتون. وبهذا الاكتشاف بدأ فعلاً عصر الفيزياء النووية الذي أثر تطوره السريع أثناء ثلاثينيات هذا القرن وأربعينياته في حياتنا ومجتمعنا تأثيراً مهماً ومثيراً. ومهما يكن من أمر، فقد فتح اكتشاف النترون باباً واسعاً لسيلٍ من البحوث النووية. إذ أُهملت فيزياء ما حول الذرة إهمالاً كلياً تقريباً،وراح الفيزيائيون من مختلف الأعمار والمؤهلات يساهمون في الفيزياء النووية من الناحيتين النظرية والتجريبية، فكان من يُدعى فيزيائياً نووياً معناه أنه أُضفي عليه لقبٌ ذو مكانة سامية.

لقد وفر النترون بحياده الكهربائي وكتلته الأكبر قليلاً من كتلة البروتون (بما يقارب كتل ثلاثة إلكترونات) التفسير المناسب لكل خواص بنية النواة واستقرارها. فهو فرميون مثل البروتون،لأن سبينه يساوي $\frac{1}{2}$ وحدة، ويؤلف الجسيمان معاً ما يدعوه الفيزيائيون «ثنائية متاكنة isotopic doublet»،وسُمي أي منهما «نكليون». وهذه التسمية لثنائية بروتون ـــ نترون كان أول من استعملها هو هايزنبرغ، وذلك بحجة أن كلا الجسيمين وجهان لجسْم أساسي واحد سماه «النكليون»، بمعنى أن كلاً منهما يمكن أن يتحول في ظروف مناسبة إلى الآخر.

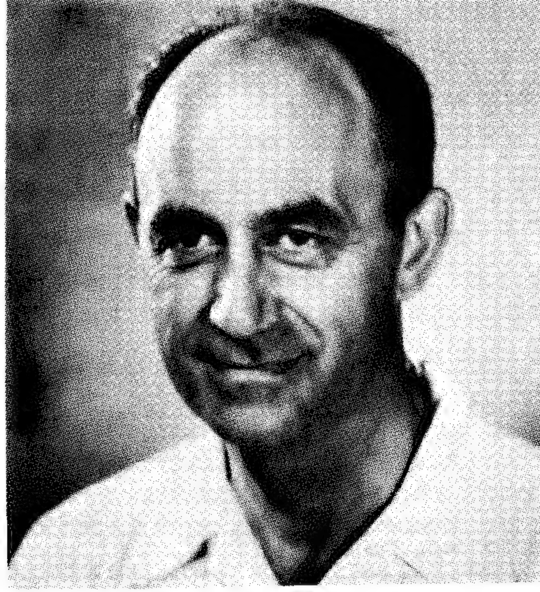
ولما كانت كتلة النترون تقرب من 1840 مرة من كتلة الإلكترون فإن طول موجته أصغر من طول موجة الإلكترون، وهذا يمكنه من الاستقرار في النواة استقراراً مريحاً من دون أن يخرق مبدأ الارتياب. أضف إلى ذلك أن كتلته الكبيرة تساعده على الدوران متهادياً حول بروتون آخر داخل النواة بدلاً من أن يحبس فيها حبساً عنيفاً كما يحبس الإلكترون الصغير الكتلة. فعدد النواة الكتلية هو مجموع بروتوناتها ونتروناتها، فإذا وجدت نواتان فيهما العدد نفسه من البروتونات وعددان مختلفان من النترونات فإنهما تكوّنان نظيرين لعنصرٍ واحد. وتتألف النوى المستقرة في الذرات التي وزنها الذري صغير، كما هو الحال في الهليوم والكربون والأكسجين، من العدد نفسه من البروتونات والنترونات، ولكن عدد النترونات يزيد باستمرار على عدد البروتونات في حال النوى الثقيلة. فنواة الأرانيوم —238 (وهو النظير العادي)، يحوي 96 بروتوناً (وهو عدده الذري) و142 نتروناً. وتكون النظائر النووية غير مستقرة إذا وجد فيها فارق كبير جداً بين عدديْ بروتوناتها ونتروناتها (أي إما بروتونات كثيرة وإما نترونات كثيرة)؛ وهذا ما يفسر السبب في أن النوى الثقيلة جداً كالأرانيوم والراديوم تكون غير مستقرة (أي نشيطة إشعاعياً).

وفيما كان الفيزيائيون النظريون يحاولون بناء نماذج نووية يمكنها أن تفسر الخواص النووية كالحجم والكتلة والسبين وطبيعة القوى الشديدة جداً التي تجعل العبث بالنواة أمراً في غاية

الصعوبة، كان التجريبيون يجمعون البيانات بخطى حثيثة، إذ حدث بعد مدة وجيزة من اكتشاف النترون تقدمٌ مهم جداً عندما أنتج الزوجان فريدريك وإيرين جوليو ــ كوري نظائر مشعة لبعض النوى الخفيفة العادية بأن قذفوها بجسيمات ألفا. وكان هذان الزوجان قد أوشكا على اكتشاف النترونات لأنهما اكتشفا، عندما كانا يشتغلان بأشعة ألفا ذات الطاقة العالية، وجود أشعة حيادية تصدر عن تفاعل أشعة ألفا مع البريليوم، ولكنهما فسرا خطأً أن هذه الأشعة هي أشعة غاما (وهي فوتونات شديدة النفاذ) ووضعا تقريراً بذلك في نشرة علمية نشراها في حزيران عام 1932. إلا أن شادويك أعلن، بعد شهر من قراءته التقرير، اكتشافه للنترون رافضاً تفسير جوليو ــ كوري، ولكن هذا لا يعني أن الزوجين كوري فقدا كل شيء، فقد تابعا بحثهما في جسيمات ألفا وقذفا بها نوى الألمنيوم العادي فأنتجا بها الفسفور ذا الإشعاع بيتا (الذي يصدر البوزترونات)، وفعلا الشيء نفسه بالبورون لينتجا الآزوت ـ13 ذا الإشعاع بيتا، فكان هذا أول مثال على نشاط إشعاعي ينتج عنه اصطناعياً جسيمات بيتا.

ولكن هذه الاكتشافات لم تكن سوى بداية لمجال بحث واسع قام به النظري والتجريبي الإيطالي العظيم إنريكو فرمي (1901-1954). فقد لاحظ فرمي سريعاً أن النترونات البطيئة أكثر فعالية من جسيمات ألفا في إنتاج النظائر الجديدة، لأنها بخلاف جسيمات ألفا، التي تلاقي بسبب شحنتها الموجبة مقاومة شديدة من النوى، لا تُصدُّ أبداً إذ لا شحنة لها، لذلك تنحشر في النوى بسهولة كبيرة. وهكذا انطلق فرمي في عام 1934 من هذه النظرة الثاقبة إلى دراسة امتصاص النوى المعروفة للنترونات البطيئة دراسة منهجية، وبيَّن أن النظائر المشعة يمكن إنتاجها في جميع الحالات تقريباً. وقد حصل، عند تعريض نوى الأورانيوم لنترونات بطيئة، على ما ظن أنها نوى عنصر يأتي بعد الأورانيوم عدده الذري 93، فكان هذا الاستنتاج أحد الأخطاء القليلة التي ارتكبها فرمي في مسيرته العلمية، ولكنه كان خطأً فادحاً لأن ما حصل عليه من تجربته بتعريض نوى الألمنيوم للنترونات لم يكن نوى عنصر ثقيل جديد بل نوى الباريوم واليود وكتلةُ كل من النواتين تقرب من نصف كتلة نواة الأرانيوم. لقد أحدث فرمي إذاً، من دون أن يدري، انشطاراً نووياً هو الذي أدى بعدما يقرب من ثماني سنوات إلى أول قنبلة نووية. فللمرء إذاً أن يتأمل في النتائج التاريخية فيما لو أن فرمي كان قد اكتشف خطأه وبقي في إيطاليا بدلاً من أن يهاجر إلى الولايات المتحدة، إذاً لكانت قوى المحور قد وضعت يدها على أسرار الانشطار النووي.

كان فرمي آخر الفيزيائيين العظام الذين كانوا يرتاحون للقلم والورقة مثلما يرتاحون لتجهيزات المختبر. وقد أصبح بذكائه الفذ وشغفه الشامل بكل فروع الفيزياء وبراعته الفائقة في الفيزياء النووية القائدَ الذي لا يجارى بين فيزيائيي النواة، فأعجب به معظم فيزيائيي إيطاليا البارزين وقصدوا مختبره في روما ليجعلوا منه مركز البحث النووي في أوربا كلها.



إنريكو فرمي (1901-1954)

كان فرمي أعظم عالم إيطالي منذ غاليليو وواحداً من أشد الفيزيائيين تأثيراً في القرن العشرين. نشأ في جو عائلي مريح، وكان والده موظفاً مدنياً يعمل في السكك الحديدية الإيطالية، وكانت والدته معلمة في مدرسة ابتدائية. أمضى سنواته الأولى في المدارس العامة في روما حيث أصبح يهتم في البدء بالعلوم، وكان ولداً لامعاً،تعلم بأن درس بنفسه أكثر مما تعلم في غرفة الصف، وقد حمله استعداده لدراسة العلم، ولا سيما الفيزياء، على الاهتمام بالرياضيات. وتذكر فرمي فيما بعد أنه «عندما كان في العاشرة من عمره حاول أن يفهم لماذا تمثّل الدائرة بالمعادلة $x^2 + y^2 = r^2$ »[1]. وصار يهتم أول أمره اهتماماً عميقاً بالفيزياء بعدما قرأ كتاباً في الفيزياء الرياضية مكتوباً باللغة اللاتينية، إذ لم يكن ثمة كتب مدرسية في الفيزياء باللغة الإيطالية في ذلك الوقت» ومع أن إنريكو لم يكن قد بلغ بعد الثالثة عشرة فقد أمضى كثيراً من أمسياته وهو يسجل ملاحظات دقيقة متأنية على حواشي الكتاب المؤلف من 900 صفحة إلى أن أصبح متمكناً من المادة كلها. وقد لاحظ أحد زملاء أبيه وهو أ. أميدي A.Amidei اجتهاد إنريكو المدرسي ودأبه فأعاره كتاباً في الهندسة الإسقاطية «فقرأ فرمي المدخل والدروس الثلاثة الأولى في غضون أيام قليلة، وبعد شهرين أصبح متمكناً من محتوى الكتاب وبرهن على جميع النظريات كما حل بسرعة أكثر من مئتي مسألة وردت في نهاية الكتاب»[2].

وقد تابع إنريكو دراسة الفيزياء بنفسه، وحالما أنهى دراساته الثانوية مبرّزاً في جميع الموضوعات بما فيها اللغتين اللاتينية واليونانية، بدأ بقراءة المؤلفات الهامة التي كتبها بلانك وبواسون وبوانكاريه. وكان يستمتع بقراءة الشعر وألف العديد من القصائد ليساعد ذاكرته. وما أن بدأ رسالته العلمية حتى ساعدته تمارين الاستظهار هذه على مسايرة التطورات الرئيسية في الفيزياء التجريبية والنظرية. وكان إنريكو يقضي معظم أوقات فراغه في هذه السنوات بصحبة زميل الدراسة إنريكو بيريسكو E.Perisco، يصنّعان معاً أجهزة لإجراء تجارب في الفيزياء، ولم ينشأ عن ذلك أن أصبح الاثنان مجربين حاذقين فحسب، بل إنهما عيّنا بدقة قيمة تسارع الثقالة في روما وكثافة الماء في شبكة مياهها والحقل المغنطيسي الأرضي »[3]. وعندما بلغ فرمي السابعة عشر، تقدم إلى مسابَقة القبول في جامعة بيزا، «فأذهلت ورقة امتحانه الفاحصين بلا ريب، إذ إنه بدلاً من أن يعطي حلول المسائل بسويتها المألوفة في المدارس الثانوية، طبّق أكثر الطرائق الرياضية تقدماً مثل المعادلات ذات التفاضلات الجزئية وتحليل فورييه في مسائل الصوت »[4]، لذلك لم يقتصر امتحانه على إقناع ممتحنيه بعبقريته فحسب بل أكسبه منحة ساعدته على إتمام دراسته من دون أن يصرف عليه ذووه[5].

وفي عام 1922 حصل فرمي على شهادة الدكتوراه في جامعة بيزا، ولكنه أدرك مقدار حاجته إلى الدراسة في معاهد تعليمية بارزة فاشترك في مسابقة فاز فيها بمنحة أجنبية موّلت دراساته عام 1923 مع ماكس بورن في غوتنغن ومع بول إيرنْفست في ليدن. وقد تعرف هذا الأخير مؤهلات مساعده الشاب الخارقة وأولى مسيرته العلمية اهتماماً بالغاً، كما عرّفه على كثير من الفيزيائيين الآخرين. وفي عام 1924 عاد فرمي إلى إيطاليا ليصبح محاضراً في جامعة فلورنسة، فطور في العامين التاليين ما يُعرف الآن بإحصاء فرمي الذي يطبَّق على الجسيمات التي تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء «أي الذي ينفي وجود أكثر من إلكترون واحد في مدار محددٍ تماماً بأعداده الكمومية »[6]. ولإحصاء فرمي هذا أهمية أساسية في الفيزياء الذرية والنووية لأنه يطبق على جميع الجسيمات التي يساوي سبينها نصف عدد فردي ($\frac{1}{2}$ ، $\frac{3}{2}$ ،..)، الأمر الذي جعل من فرمي واحداً من النظريين البارزين في أوربا، كما أُقر له بقيمة عمله رسمياً حين عُيِّن في كرسي الفيزياء النظرية الأول في جامعة روما.

كان تعيين فرمي في روما وسيلة فعالة لإحياء الفيزياء الإيطالية التي لم تكن موضع تقدير كبير في عشرينيات القرن، وهذا ما جعل فرمي، على الرغم من عدم محبته للأعباء الإدارية، يخصص كثيراً من وقته لتجميع الطلاب البارزين (الذين أصبح الكثير منهم فيما بعد علماء جيدين معتبرين في ميادينهم الخاصة). كما شجعت أعماله الكثير من الطلاب الغرباء بما فيهم هنز بيت H.Bethe وإ. تيلر E.Teller على المجيء إلى روما والدراسة فيها، وقد ساعد تأسيس مدرسة عليا للفيزياء في روما على جعل الجامعات الأخرى في إيطاليا تحيي أقسام الفيزياء فيها.

وكان فرمي أثناء إقامته في روما يطوّر نظريته في التفكك بيتا في ظل فرضية النترينو التي كان اقترحها باولي لتفسير ظاهرة عدم انحفاظ الطاقة والاندفاع في التفكك بيتا، إذ إن « باولي وجد أنه لا خروج من هذه المفارقة الظاهرة إلا بافتراض فكرة الإصدار الآني للإلكترون ولجسيم آخر لا يمكن كشفه عملياً هو ما سماه فرمي فيما بعد النترينو »[7]. ولحل المشاكل التي طرحها هذا النترينو افترض فرمي وجود قوة جديدة هي التي تدعى اليوم « القوة الضعيفة »، وهي تسمية أُطلقت عليها لأنها أضعف كثيراً من القوة النووية الشديدة. وللقوة الضعيفة وجود في كافة تفاعلات الجسيمات التي تشمل النترينو، ويعتقد الفيزيائيون أنها مع قوة الجاذبية الثقالية والقوة الكهرطيسية والقوة الشديدة تؤلف كل ما يحتاجه الكون لبنائه.

وفي عام 1934 قذف فريدريك وإيرين جوليو ــ كوري البورون والألمنيوم بجسيمات ألفا فاكتشفا النظائر الاصطناعية المشعة ونالا جائزة نوبل على عملهما. وقد اعتقد فرمي أن النترون العديم الشحنة لا بد أن يكون أفضل قذيفة لقذف العناصر، لأن النواة المشحونة لا يمكن أن تصده، وأن احتمال اختراق نوى الهدف أكبر كثيراً[8]، فقذف فرمي فعلاً عدداً من العناصر بالنترونات بعد أن وضع حاجزاً من البارافين بين مصدر النترونات والعناصر المستهدفة، فاكتشف بذلك ما يعرف بـ « النترونات البطيئة »... وكانت هذه النترونات أشد قدرة على اختراق نوى العناصر المستهدفة من النترونات العادية، لأنها كانت تصطدم بذرات البارافين الهدروكربونية التي تبطئ من حركتها وتمكنها من البقاء « مدة طويلة في جوار نوى الهدف تكفي لأن يزيد حظها في الامتصاص »[9] وقد استخدم فرمي النترونات البطيئة لكي يقذف بها كثيراً من العناصر المختلفة فتمكن بذلك من دراسة خواص النظائر المشعة المتولدة بهذه التجارب. وعندما قذف الأورانيوم بنترونات بطيئة توصل إلى الانشطار النووي إلا أنه ظن خطأً أنه قد أنتج من الأورانيوم عنصرين سماهما « أوزنيوم » و« هِسْبيريوم »، ولم يكشف النقاب عن النتائج الحقيقة لهذه التجارب حتى عام 1938 عندما اكتشف أوتو فريش هان Otto Frich Hahn ومساعدته ليز ميتنر Lise Meitner أن ما حدث هو انشطار نووي، إلا أن هذا الخطأ لم يمنع من الإقرار عالمياً بقيمة عمل فرمي التجريبي باستعمال النترونات البطيئة فنال في عام 1938 جائزة نوبل في الفيزياء.

كان عمل فرمي في روما يتم في ظل حكم موسوليني الدكتاتوري الفاشي، ولكنه على الرغم من معارضته التسلط العسكري في الحكومة الإيطالية وقلقه بوجه خاص بشأن النفوذ الألماني المتزايد في إيطاليا (الذي كان يظهر في تزايد القوانين الخاصة بمعاملة اليهود) إلا أنه، مع ذلك، لم ينتقد الحكومة صراحة. وكانت زوجته لورا التي تزوجها في عام 1928 من أسرة يهودية بارزة، فتملكه الخوف بشأن سلامتها، ولم يهدىء من روعه كونها ابنة أميرال في البحرية الإيطالية، لذلك كان قد قرر مسبقاً عند ذهابه إلى استوكهلم عام 1938 لاستلام جائزة نوبل أن يغادر إيطاليا إلى الأبد فتوجه مباشرة بعد

مراسم المنحة إلى نيويورك حيث استلم منصب أستاذ في جامعة كولومبيا.

وبعد أن علم فرمي باكتشاف الانشطار النووي،بدأ يقوم في جامعة كولومبيا بتجارب ليرى هل يمكن إطالة أمد التفاعل المتسلسل، فرأى أن مفتاح العملية كله هو إبطاء سرعة النترونات (على ألا يصل إبطاؤها إلى درجة أسرها داخل النوى من دون أن تحدث انشطارات أخرى). وظل يجري تجاربه إلى أن وقع أخيراً على الغرافيت لكي يجعل منه مادة مهدئة.

ولم تغب أهمية طاقات التفاعل المتسلسل المستمر، فيما يتصل بالشؤون العسكرية، عن بال فرمي ومساعديه، لذلك حاولوا إقناع حكومة الولايات المتحدة لتأسيس برنامج بحث في الانشطار النووي، إلا أن الدعم الملائم لم يكن قريب المنال، ويعود السبب في معظمه إلى جدة البحث، كما أن جزءاً آخر نشأ عن نقص القوة العاملة والتجهيزات المادية اللازمة لبناء مفاعل نووي ناجح، فقد كان حجم العمل أكبر من قدرة فرمي أو أي شخص آخر، كما أعاق جهودَه الخاصة كونه أجنبياً من الأعداء وعدم رغبته في اتخاذ دور أكبر في إدارة مشروع للأبحاث الذرية. وكانت جهوده في جامعة كولومبيا مركزة في الحصول على تفاعل متسلسل باستعمال الأورانيوم العادي، ولكن سرعان ما تبين أن نظيره U^{235} يكفي وحده.

وفي ذلك الوقت دخلت الولايات المتحدة الحرب العالمية الثانية في نهاية عام 1941. وكانت المكاتب المكلفة بإدارة تطوير القنبلة الذرية قد تأسست. ثم إن الفشل الذي منيت به قوى الحلفاء في بادئ الأمر بين عامي 1941 و1942 كان أيضاً سبباً في تعجيل استغلال الانشطار الذري في التطبيقات العسكرية. ففي عام 1942 رحل فرمي إلى شيكاغو حيث وجه الجهود إلى بناء أول مفاعل للانشطار «الذاتي الدعم» في مختبر سري تحت ساحة ستاغ **Stagg Field** في جامعة شيكاغو «إذ بدأ فرمي ومساعدوه في بناء المفاعل،مستخدمين الغرافيت الصرف مهدئاً يبطىء النترونات والأورانيوم المخصَّب مادة انشطارية. وكان المفاعل يتألف من نحو **40000** قطعة غرافيت أُنتجت خصيصاً لاستبعاد الشوائب منها، وجعل فيها ما يقارب **22000** ثقب لتسريب عدة أطنان من الأورانيوم إلى الداخل»[9]. وفي 1942/12/2، أي بعد ما يقرب من مرور عام على مهاجمة اليابان لميناء بيرْل هاربر، انطلق مفاعل فرمي الذري في تفاعل متسلسل مستمر حرج. وفي عام **1944** غادر فرمي شيكاغو متوجهاً إلى لوس ألاموس في نيومكسيكو ليعمل مستشاراً عاماً لروبرت أوبنهايْمر رئيس مشروع منهاتن. وهناك في لوس ألاموس شهد فرمي أول تجربة ناجحة للقنبلة الذرية بالقرب من آلاموغوردو وفي نيومكسيكو بتاريخ 1945/7/16.

وفي عام 1945 عاد فرمي إلى جامعة شيكاغو التي بقي فيها حتى آخر أيامه، إذ تخلص هناك من أعبائه الإدارية، التي كان يمقتها، بعدما أصبح أستاذاً في معهد الدراسات النووية الذي كان قد أسس حديثاً. وهكذا صار لديه الوقت لأن يعلّم فئة الطلاب البارزين من الخريجين الذين توصل

عدد منهم مثل مرّى غيلمان Murray Gell-Mann وتسونغ ــ داوْلي Tsung-Dao Lee وشين ننْغ يان Chen Ning Yang إلى نيل جائزة نوبل. وشيئاً فشيئاً حول فرمي اهتمامه من الفيزياء النووية إلى الجسيمية، إذ إنه شعر بأن معظم الاكتشافات الهامة كانت قد تمت سابقاً في الميدان الأول. كما سبق أن أثار اهتمامه بالفيزياء الجسيمية تكاثر التشوش فيها الذي اكتشف في الثلاثينيات والأربعينيات وكذلك في الخمسينيات، لذلك بحث فرمي كالعديد من الفيزيائيين عن إمكان إيجاد نموذج أساسي كامن وراء هذا الحشد من الجسيمات، ولكن جهوده لم تثمر، ومع ذلك فقد قام بعمل تجريبي مفيد عن التبدد البيوني وبعمل نظري عن أصل الأشعة الكونية. والحقيقة أن فرمي قام بدور غير مباشر في البحث الذي تُوِّج أخيراً في ادعاء غِيلمان (أحد طلابه) بأن المادة تتألف من جسيمات أساسية تدعى «كواركات».

وقد ثابر فرمي على نشاطه بين الجماعة العملية فوزع وقته بين عمله الخاص وتعاونه مع الفيزيائيين الآخرين. إلا أن نشاطه هذا تباطأ ولا سيما في عام 1954 حينما أظهر الفحص الطبي وجود سرطان في معدته، فعرف عندئذ أنه لم يبق من حياته سوى القليل؛ ومع ذلك فقد حاول الاستمرار في عمله على أفضل ما يستطيع، ورفض أن يقف المرض حائلاً دون مواصلة عمله اليومي إلى أن تدهورت صحته وأُدخل المستشفي في الشهر التاسع عام 1954 فظل يصارع آلام السرطان الموهنة مدة شهرين، ولكنه استسلم أخيراً للموت في الشهر الحادي عشر ودُفن في شيكاغو. وبعد موته أُطلق على العنصر المئة اسم فرميوم وعلى وحدة الطول 10^{-13} اسم فرمي تكريماً له، كما أعيدت تسمية مختبر المسرّعات الوطني في باتافيا من ولاية إيلّينوى باسمه (مختبر فرمي) وذلك اعترافاً بتميزه الفريد في كلا المجالين التجريبي والنظري، كما أسست منحة وطنية خاصة سميتْ جائزة فرمي تكريماً له.

لقد فسحت بحوث فرمي في الفيزياء النووية مجالاً لقياس أحجام النوى باستخدام تجارب التبعثر التي ترتد فيها البروتونات العالية الطاقة عن النوى؛ فأدت هذه التجارب في الوقت نفسه إلى تعيين شدة القوى النووية ومداها، فوجد أن شدتها تفوق شدة القوة الكهرطيسية ببضع مئات المرات، إلا أن مداها في غاية الصغر إذ يقرب من عُشْر التريليون (أي فرمي) من السنتمتر. وقد دُعيت هذه القوة النووية أيضاً بسبب شدتها العظيمة «القوة الشديدة» أو «التفاعل الشديد». ويُظهر تبعثر النترونات العالية الطاقة على النوى أن القوة النووية هي دائماً قوى تجاذب، وهي أيضاً نفسها في النترونات كما في البروتونات، إذ وجد أن القوة الشديدة مستقلة عن الشحنة الكهربائية، أي أن البروتونات تجذب البروتونات والنترونات تجذب النترونات، كما أن البروتونات تجذب النترونات بقوى كلها متساوية. ولما كان مدى القوى النووية قصيراً جداً لذلك يجب أن يخترق البروتون في بادئ الأمر حاجز قوة كولون الكهراكدية المنفِّرة التي تنشأ من شحنة النواة الموجبة، ثم يقع بعد ذلك تحت تأثير القوة الجاذبة الشديدة، فيُجذب إلى داخل النواة لتتكون نواة جديدة أثقل من السابقة. وبالفعل إذا كان ثمة نواتان مختلفتان تسيران بسرعة كافية فإن بإمكان كلٍ منهما أن تخترق

حواجز كولون للأخرى وأن تلتحما معاً بسبب قوى الجذب النووية المتبادلة بينهما فيكونان معاً نواة مركبة . وهذا النوع من الكيمياء النووية يقوم بدور مهم جداً في بنية النجوم وتطورها ، إذ تولّد النجوم إشعاعها بهذه الطريقة (أي بالاندماج النووي الحراري) .

وعندما بدأ الفيزيائيون يسبرون بنى النوى لمعرفة المزيد والمزيد عن تفاصيلها ، كان عليهم أن يطوروا آلات كهرطيسية خاصة يمكنها أن تسرّع الجسيمات السابرة (أي الإلكترونات والبروتونات) لكي تبلغ سرعاً أكبر فأكبر . وكان هناك نوعان من هذه الآلات المسرّعة ، إحداهما خطية لتسريع الإلكترونات في المقام الأول والأخرى دائرية لتسريع البروتونات . وتتحرك الإلكترونات في المسرع الخطي Linear accelerator (ليناك Linac) عبْر سلسلة من الأسطوانات المتساوية مع الإبقاء على فرقٍ في الكمون (فرق الجهد) بين كل أسطوانتين متتاليتين بحيث تأخذ سرعة كل إلكترون دفعة عند انتقاله من أسطوانة إلى التي تليها . وقد يحوي المسرّع الخطي الحديث آلاف الأسطوانات ويمكن أن يبلغ طوله عدة كيلومترات ، كما يمكن أن يبلغ فرق الكمون (التوتر) بين أسطوانتين متجاورتين نحو 100000 فلط لذلك قد تصل سرعة الإلكترونات في مثل هذه المسرعات إلى ما يقرب من سرعة الضوء ، وطاقته إلى ما يقرب من 50 مليار إلكترون فلط (50 GeV) .

أما المسرع الدائري فهو التعديل الحديث للسكلوترون ، وقد بَنى أول مسرع من هذا النوع (بقطر بضعة سنتمترات) إرْنست أُرلاندو لورنس في أوائل الثلاثينيات . أما مسرعات اليوم الدائرية فهي حلقة من المغنطيسات المتتالية القوية جداً والمرّتبة على طول محيط الدائرة الداخلية للحلقة ، ويبلغ قطر الأنبوب المفرَّغ الذي تتحرك البروتونات داخله نحو سنتمتر ، كما يحافظ على استمرار حركة البروتونات على طول الأنبوب ، من دون أن تنتشر ، بوساطة سلسلتين من المغانط ، توجّه إحداهما البروتونات على طول المدار الدائري وتحافظ الأخرى (أي المغانط المجمِّعة) على البروتونات ملمومة في حزمة . وتسرَّع البروتونات مرحلة بعد أخرى حتى تصل السرعة (أو الطاقة) المطلوبة بوساطة صف كبير العدد من التوترات المتزايدة ، وكلما كبر محيط الأنبوب المفرغ ازدادت سرعة البروتونات في كل مرة تجتاز فيها الأنبوب . وقد بنيت مسرعات دائرية تبلغ محيطاتها عدة كيلومترات للحصول على بروتونات هائلة الطاقة . وأضخم مسرع يعمل حالياً في CERN (Centre European de Recherche Nucléaire) (الأحرف الأولى من الاسم الفرنسي للمركز الأوربي للبحث النووي) . وقد أمكن الحصول بهذا المسرع على طاقة من رتبة 540 GeV ، ولكن لم يتم الوصول إلى هذا الحد إلا بتقنية الاصطدام التي تتحرك فيها البروتونات عبرْ الأنبوب المفرَّغ في اتجاه واحد ويتحرك معه في الاتجاه المعاكس سيل من البروتونات المضادة (الضديدة) . وعندما يصطدم البروتون وضديده تتحول طاقة الجسيمين الحركية كلها إلى جسيمات من مختلف الأنواع فنحصل بذلك على طاقة اصطدام تعادل مثليْ ما نحصل عليه من اصطدام البروتونات بهدفٍ ثابت . وتدعى هذه المسرعات الدائرية ، التي تتصادم فيها الجسيمات وضديداتها ، « مصادمات Colliders ». وتوضع اليوم تصاميم

لمصادمات تبلغ أقطارها نحو 48 كيلومتراً أو 65 كم ، فإذا قُدّر لمثل هذه المصادمات العملاقة أن تُنشأ يوماً ما ، فإنها ستنتج طاقات اصطدام تبلغ تريليونات (تيرا) إلكترون فلط (TeV) .

وتشير علاقة أينشتاين بين الكتلة والطاقة ($E = mc^2$) إلى أن جزءاً لا بأس به من كتل الجسيمات المتفاعلة يتحول عند التفاعلات النووية إلى طاقة ، لذلك فإن قياس كتل النوى أمر مهم جداً ، إذ يساعدنا هذا القياس على تعرف نوى جديدة يمكن أن تتكون نتيجة التفاعلات النووية ، كما يساعدنا على اختبار علاقة أينشتاين كتلة ــ طاقة التي لم يُعثر قط على أي استثناء لها .

وقد قيست أيضاً بدقة كبيرة خاصة نووية مهمة أخرى هي السبين الذي قاسه الفيزيائي الأمريكي إ. إ. رابي I.I.Rabi بطريقة « الحزمة الجزيئية » التي طورها بمهارة ونجاح عظيمين . فالنواة ذات السبين ليست ، بسبب شحنتها الكهربائية ، سوى مغنطيس صغير جداً ، وتتوقف شدة مغنطيس نووي كهذا على مقدار سبينه (عدد وحدات $\hbar$) ، وعلى مقدار شحنته الكهربائية ، لذلك إذا أرسلت حزمة نووية عبر حقل مغنطيسي فإنها تتبادل معه التأثير (إذ تكتسب منه النوى طاقة دورانية) كما تتوقف شدة هذا التأثير على سبين النوى ؛ فإذا تغيرت شدة الحقل المغنطيسي عبر حزمة النوى فإن الحزمة تتجزأ إلى حزم مختلفة يتوقف عددها على عدد وحدات سبين النوى في الحزمة الأصلية ؛ فإذا كان سبين كل نواة $\frac{\hbar}{2}$ (أي نصف وحدة سبين) ، انقسمت الحزمة عندئذ إلى حزمتين ، وإذا كان سبين النواة 1 (أي وحدة سبين كاملة) تولدت بالحقل المغنطيسي ثلاث حزم متمايزة وهكذا دواليك ، ونحصل بهذه الطريقة على السبينات النووية بلمحة خاطفة ، وقد كان لها دور هام في تطبيقات مختلفة كما كانت الأساس الذي قام عليه التجاوب المغنطيسي النووي (NMR) Nuclear Magnetic Resonance .

وهكذا بدأ المجربون بجمع البيانات المفصلة عن النوى وبرزت معها عندئذ مباشرة سلسلة من الأسئلة النظرية المتعلقة بالفيزياء النووية ، وكانت معظم هذه الأسئلة تبحث في طبيعة القوى النووية الشديدة التي تحتفظ بالنترونات والبروتونات متماسكة داخل النواة الضئيلة على الرغم من قوة التنافر الكهراكدي بين البروتونات ، وكان على النظري الذي يريد أن يضع نموذجاً للنواة (كما فعل بور لأجل الذرة) أن يعرف طبيعة قواها الرياضية ، كما كان عليه أن يعرف هل تنطبق قوانين ميكانيك الكم على النواة أم لا . وقد أتت الإجابة عن هذا السؤال الأخير في بحثين منفصلين ؛ ففي عام 1928 فسر الفيزيائي الروسي جورج غاموف George Gamow تفكك النوى الثقيلة الذي يعطي جسيمات ألفا ، كما في الأورانيوم ــ238 ، بأن طبق معادلة شرودنغر على جسيمات ألفا داخل نواة ثقيلة وبيّن أن هذه الجسيمات ألفا « تحفر » بسبب خواصها الموجية « نفقاً » في حاجز النواة الكموني ، واستطاع غاموف أن يحسب من معدل « حفر هذا النفق » ، كما تعطيه دالة الجسيم ألفا الموجية ، عمر النصف

لنواة الأرانيوم ، وقد كان لهذا النوع من الحساب فيما بعد نصيب كبير في دراسة الاندماج النووي الحراري في باطن النجوم .

وكان غاموف قد قام بعمله هذا قبل اكتشاف النترون ، لكن هذا الاكتشاف ساعد هنز ألبرت برخت H.A.Brecht ورودلف بيرلز R.Peirles على بناء أول نموذج نظري لنواة بسيطة هي الدوترون (D) وقد استوحيا هذا النموذج من اكتشاف هـ . ك . أوري H.C.Urey عام 1931 للماء الثقيل وهو مركب يتألف من ذرتي هدروجين ثقيل الدوترون (الدوتيريوم) ومن ذرة الأكسجين العادية (أي D_2O) . أما الدوترون فيتألف من بروتون واحد متماسك بوساطة القوة النووية مع نترون واحد ، لذلك فهو في الفيزياء النووية كالهدروجين في الفيزياء الذرية لأنه أبسط نواة . وهكذا شعر بيت وبيرلز أنهما ، إذا حلا بميكانيك الكم مسألة الدوترون ، فإنهما قد يتوصلان إلى نموذج ميكانيك كمومي للنواة مثلما أدت معادلة شرودنغر من حالة الهدروجين إلى تطوير ميكانيك الكم بوجه عام . وقد نجحا فعلاً إلى حدٍ ما ، ولكن نظرية الدوترون الميكانيكية الكمومية ظلت ناقصة لأن طبيعة القوة الرياضية بين البروتون والنترون كانت لا تزال غير معروفة ، وهذا ما جعلهما غير قادرين على كتابة معادلة شرودنغر الصحيحة للدوترون ، فلجأ بيت وبيرلز إلى تجنب هذه الصعوبة بأن فرضا وجود تأثير متبادل بين البروتون والنترون بشدة مناسبة ومجال صحيح وبيَّنا أن الصورة (أو الصيغة الرياضية) لهذا التأثير لا أهمية لها . ومهما يكن من أمر ، فقد أثبتا بذلك صلاحية ميكانيك الكم في معالجة التأثيرات المتبادلة كما أرسيا نماذجَ النواة . ومع ذلك ، فإن معالجة البنية النووية معالجة ميكانيكية كمومية هي أصعب بكثير من معالجة جزء الذرة الخارجي ، إذ يجب معالجة البروتونات والنترونات داخل النواة على قدم المساواة ، ثم إن النواة ، بخلاف الذرة نفسها ، ليست منظومة شمسية لها مركز ثقيل تحيط به كواكب من الجسيمات الخفيفة جداً تتحرك في مسارات معينة تعييناً حسناً ، ولكن معالجة النواة بطريقة ميكانيكية كمومية نجحت ككل أيّما نجاح .

ومع أن القوة النووية الشديدة هي التي تحدد بنية النواة وتسيطر على تحريك (ديناميك) الجسيمات النووية فإن هناك قوة أخرى ، هي التأثير المتبادل الضعيف ، لها دورها في نشاط النوى المشعة التي تصدر جسيمات بيتا (إلكترونات) . وهذه النوى (أو النظائر) هي تلك التي تحوي من النترونات أكثر كثيراً من البروتونات ، وهذا هو ما أثبته فرمي تجريبياً بأن ولّد نشاطاً إشعاعياً اصطناعياً بقذف النوى المستقرة بنترونات بطيئة لكي ينتج نظائر غنية بالنترونات . وقد اكتشف الفيزيائيون عند دراسة الذرات ذات النشاط الإشعاعي الطبيعي بيتا في عشرينيات القرن أن هناك ما بدا أنه سبين وأنه اختلاف في التوازن بين النواة الأصلية النشيطة إشعاعياً التي تصدر جسيم بيتا والنواة المتبقية بعد الإصدار ، إذ إن كتلتها أصغر دائماً من كتلة النواة المصدرة (الأصلية) ، فلابد إذاً أن يساوي فرق الكتلة هذا ، بحسب علاقة أينشتاين كتلة ـــ طاقة ، كتلة الإلكترون المنطلق مضافاً إليها الكتلة المعادلة لطاقته الحركية . ولكن الأمور لم تجر دائماً على هذا النحو لأن سرع

الإلكترونات المنطلقة من عددٍ ضخم من النوى المتطابقة، ذات النشاط الإشعاعي بيتا تراوح بين الصفر وأقصى قيمة ممكنة فأدهش طيف السرع المتصل هذا الفيزيائيين وأصابتهم الحيرة لأنه كان يتعارض جدياً مع مبدأ انحفاظ الطاقة المقدس فكانت هذه الأزمة الناتجة عن اختلاف ميزان الطاقة، والتي يبدو أنه لا يمكن تجنبها، شديدة شدةً جعلت بعض الفيزيائيين النابهين، ومنهم بور، يعرضون فكرة التخلي عن انحفاظ الطاقة في العمليات النووية، غير أن هذه البادرة المتطرفة لم تكن لتزيل الصعوبات كلها معاً، لأن اختلال ميزان السبين كان سيظل قائماً، إذ تدل الحسابات على أن سبين النواة المتبقية إما أن يظل على حاله عند إطلاق أشعة بيتا، وإما أن يتغير بمقدار وحدة كاملة. ولكن الأمور لا تجري هكذا عند إطلاق إلكترون وحيد، بل يجب أن يكون الفرق بين سبين النواة الأصلية وسبين النواة المتبقية هو نصف وحدة في كل عمليات النشاط الإشعاعي ـــ بيتا، لأن سبين الإلكترون نفسه هو $\frac{1}{2}$ وحدة. فمن الواضح إذاً أن التفكك النووي بيتا يجب أن يتضمن شيئاً آخر غير إصدار الإلكترون، وهذا ما دفع باولي بالضرورة إلى أن يقترح في عام 1930 فكرة جسيم جديد يصاحب الإلكترون وذلك كمخرج يائس من المعضلة التي خلقها إصدار إلكترون وحيد في حال التفكك بيتا. وقد دعا هذا الجسم «نتروناً» ولكن فرمي غيّر هذه التسمية بعد ذلك وسماه نترينو (جسيم صغير حيادي) وكان معظم الفيزيائيين قد رأوا في هذا الاقتراح جرأة وشططاً في الخيال، لأن الجسيمات الأساسية الوحيدة التي كانت معروفة آنذاك هي الفوتون والإلكترون والبروتون؛ وكان يظن أن هذه الجسيمات مناسبة لتفسير جميع خواص الطاقة والمادة، ولكن كان لابد من القيام بعملٍ ما متطرف لإنقاذ مبدأ انحفاظ الطاقة وهكذا بدأ النترينو يلقى القبول تدريجياً بين جمهور الفيزيائيين.

ولم يُعزَ للنترينو شحنة كهربائية أو مغنطيسية أو حتى كتلة، بل عُزي له سبين يساوي نصف وحدة لكي يستقيم أمر التفكك بيتا مع قوانين الفيزياء المسلّم بها، أو بعبارة أخرى، يبدو أن هذا الجسيم الجديد ـــ النترينو ـــ قد قُصد به أن يكون من غير الممكن رصده ما عدا أن بإمكانه نقل الطاقة حتى ليمكن أن توجد نترينوهات ذات طاقات مختلفة؛ والغرض الأساسي من تعدد النترينوهات هو اعتدال ميزان الطاقة في التفكك بيتا، كما أن السبين $\frac{1}{2}$ الذي خُص به النترينو يقوِّم السبين، إذ إن طاقة النترينو الذي ينطلق في التفكك بيتا مع الإلكترون يسد نقص الطاقة الذي يرافق انطلاق الإلكترون وحده. ولكن النترينو مراوغ جداً فتفاعله مع المادة ضعيف ضعفاً يجعله يجتاز المجرة كلها من دون أن ينحرف عن مساره، إلا أن ك. كوفان C.Cowan و ف. ريْمز F.Reims استطاعا أن يرصداه أخيراً في عام 1956 باللجوء إلى تجربة بارعة جداً.

لقد أصبحت عملية التفكك بيتا مفهومة الآن عن آخرها بوجود النترون الذي لم يكن قد

اكتُشف بعد عندما افترض وجود النترينو . إن النترون جسيم غير مستقر حين يكون خارج النواة ، وكان يعتقد منذ البدء أنه يتفكك في مدة 12 دقيقة وسطياً إلى بروتون وإلكترون ونترينو ، ولكن من المعروف حالياً أنه يتفكك إلى بروتون وإلكترون وضديد النترينو بدلاً من النترينو إذ للنترينو أيضاً ضديد ، مثل الإلكترون الذي ضديده البوزترون ومثل البروتون وضديده البروتون المضاد وكذلك النترون وضديده النترون المضاد ، ولكن النترينو ليس له شحنة لذلك يختلف عن ضديده بالسبين فحسب تبعاً لاتجاه سرعة دورانه (بعكس عقارب الساعة أو مع عقارب الساعة) ولكن هذه الوقائع كلها لا تُغير شيئاً من الدور الذي يقوم به تفكك النترون في التفكك ــ بيتا للنظائر النووية الغنية بالنترونات ، فالنترون لا يتفكك في النظائر المستقرة ، أما في النظائر غير المستقرة التي تحوي وفراً في النترونات فيتحول نترون واحد إلى بروتون وينطلق الإلكترون وضديد النترينو من النواة لتبدأ عملية التفكك ــ بيتا ، كما يمكن أن يتكون النترون من اندماج بروتون وإلكترون ونترينو مضاد . والحقيقة أن هذه العملية الأخيرة هي أول مرحلة في اندماج أربعة بروتونات اندماجاً حرارياً نووياً لتكوين نواة الهليوم في الأعماق الداخلية للنجوم كالشمس مثلاً ، إذ تنتج هذه النجوم طاقتها باحتراق الهدروجين احتراقاً حرارياً نووياً .

ومع أنه كان عُرف كثير من التفككات بيتا بالاختبار التجريبي ، إلا أنه لم تظهر إلى الوجود نظرية ميكانيكية كمومية لهذا التفكك إلا حين تقدم فرمي عام 1934 بنظرَيته التي تضمنتها نشرة عملية هي من أشهر نشرات الفيزياء العملية الهامة التي طوّر فيها فرمي نظرية إصدار النترونات للإلكترونات والنترينوهات (أو ضديدات النترينو) وامتصاص البروتونات لها في التفكك ــ بيتا ، وهذا على غرار إصدار الإلكترونات للفوتونات وامتصاصها لها في التفاعلات الكهرطيسية . وقد أدخل فرمي لإجراء دراسته قوة حقل جديدة هي القوة الضعيفة التي يُقرن بها النترينو بثابت اقتران (ثابت فرمي) مشابهٍ لاقتران الإلكترون مع الحقل الكهرطيسي بشحنة الإلكترون . وقد استطاع فرمي بنظرية الحقل الضعيف هذه أن يستنتج طيف متجهات سرعة الإلكترونات في التفكك بيتا بصورته الصحيحة . كما حسب من البيانات التجريبية المعطاة عن تفكك بيتا مقدارَ ثابت اقتران النترينو ، وأثبت أنه أصغر بعدة قوى للعشرة من ثابت اقتران الإلكترون الكهرطيسي، أو بعبارة أخرى ، إن التفاعل الضعيف أضعف كثيراً من القوة الكهرطيسية ، ولكنه أقوى من قوة الثقالة .

لنعد الآن إلى بعض نماذج النوى التي كان قد اقترحها بعضهم مع أخذ التفكك بيتا بعين الاعتبار وتفهم دور النترينو فيه ؛ ولكن لما كانت صيغة التفاعل النووي الرياضية مجهولة ، فإن من المستحيل القيام بمعالجة نواة معقدة معالجةً ميكانيكية كمومية تامة ، غير أنه يمكن بناء نموذج معقول يعطي نتائج لا بأس بها عن طريق دراسة تفاعلات النوى التي هي من قبيل تلك التي تحدث في بواطن النجوم . ولكي نراعي في هذا النموذج كلاً من قوة الجذب النووي الشديدة القصيرة المدى

وقوة التنافر الكولوني البعيدة المدى ، نمثل النواة تمثيلاً مجازياً بصورة بئر عميقة (قوة الجذب الشديدة) محاطةً بحافة مرتفعة شديدة الانحدار (التنافر الكهراكدي أو حاجز كولون) تهبط منحدرة من جميع جهاتها حتى سوية الأرض (مثل فوهة بركان خامد) ، وكلما كان وزن النواة الذري أكبر كانت البئر أعمق ، وكلما كان العدد الذري مرتفعاً كانت الحافة أعلى . ويمكن أن تتكون نواة مركبة من نواتين فيما لو كانت هاتان النواتان تتحركان بسرعة تكفي لأن تخترق كل منهما حاجز الأخرى الكولوني ، لأنهما ستسقطان عندئذ في البئر النووية المشتركة التي تكونانها .. وقد يبدو هذا النموذج بدائياً ولكنه طبق بنجاح كبير على توليد طاقة النوى الثقيلة وعلى تكوُّنها داخل النجوم من نوى خفيفة . والحقيقة أن أول من بدأ هذا التحليل هو هنزبيت في أواخر الثلاثينيات عندما أثبت أنه في النجوم التي تساوي كتلتُها كتلة الشمس أو أقل منها ، تكون سيرورة الحرارة النووية السائدة ، التي تحكم بنية هذه النجوم وتهيمن على توليد طاقتها وعلى تطورها البطيء ، هي سلسلة التفاعل بروتون ـــ بروتون التي تندمج فيها ، عبر سلسلة من المراحل ، أربعة بروتونات لتكوِّن نواة ^4He (أي نواة الهليوم) . أما في النجوم الأكبر كتلة من الشمس فإن العملية الحرارية ـــ النووية السائدة هي أيضاً اندماج أربع نوى لتكوين نواة ^4He ، ولكنها تسير بصورة غير مباشرة بدلاً من أن تتم مباشرة ، فتشتمل على نواة الكربون التي تستهل العملية بامتصاص بروتون يليه امتصاص ثلاثة بروتونات ، واحداً في كل مرة ، مع ظهور نواة جديدة (أثقل) بعد كل امتصاص إلى أن يكتمل امتصاص البروتونات الأربعة . ولكن نواة الكربون الأصلية تعود ، بعد آخر امتصاص كهذا ، إلى الظهور مع جسيم ألفا (نواة الهليوم) ، ولما كانت نواة الكربون حفَّازة نووية في هذه العملية لذلك سميت هذه السيرورة « دورة الكربون » .

وقد أدت الفيزياء النووية إلى صناعتين مهمتين ، إحداهما مدمرة (القنبلة النووية) والثانية بنّاءة (الطاقة النووية) ؛ وكانت كلا الصناعتين وليدة ضرورات الحرب العالمية الثانية العسكرية . وإذا كان فرمي ، كما ذكرنا آنفاً ، قد توصل من دون أن يدري إلى الانشطار النووي حين قذف الأورانيوم بنترونات بطيئة ، فإننا في الحقيقة ندين رسمياً بهذا الاكتشاف إلى أوتو هان وفريتز ستراسمان وليز مِيْتنر الذين أعادوا في عام 1938 تجربة فرمي واستنتجوا على الوجه الصحيح أن النترون البطيء يسبب عند دخوله في نواة الأورانيوم تفجيرها إلى شطرين . وقد فُهمت هذه السيرورة بفضل النموذج الذي اقترحه بور للنواة والذي يسمى نموذج قطرة السائل حيث تتماسك الجزيئات في قطرة الماء بقوة شديدة نسبياً وذات مدى قصير وتعمل بين الجزيئات المتجاورة وتسمى قوة فان درفالس ، ولكن يمكن أن تنقسم القطرة بقوة خارجية قُطرية إلى قطيرتين متساويتين ، وهذا ما يمكن رؤيته عندما يكوِّن السائل عند طرف قضيب زجاجي شاقولي قطراتٍ متتابعة تتساقط على الأرض ، فالثقالة هنا هي القوة التي تواصل جذب القطرات لتفصلها عن طرف القضيب . كذلك فإن النواة الثقيلة التي تمتص نتروناً بطيئاً تأخذ بالاهتزاز بتأثير طاقة النترون ، ثم ما أن يبتعد نصفاها أحدهما عن الآخر حتى يضعف التجاذب النووي بينهما بسرعة ، بسبب مداه القصير ، إلى أن تفصل قوة التنافر الكولوني الجزأين

نهائياً ويحدث الانشطار النووي وعندئذ يندفع الجزءان مبتعدين أحدهما عن الآخر بسبب قوة التنافر الكهراكدية المتبادل بينهما ، وتكون طاقة كل منهما من رتبة 200MeV ، وهذه الطاقة الكبيرة ليست ناشئة عن النترون البطيء الذي اقتصر عمله على إطلاق العملية كلها وإنما عن التنافر الكهراكدي .

وقد اكتشف الفيزيائيون عاجلاً أن النظير العادي للأورانيوم الذي وزنه الذري 238 (^{238}U) لا ينشطر عند تفاعله مع النترون ، أما الذي ينشطر فهو نظيره (^{235}U) ، ولما كانت نسبة النظير 235 في مكامن الأورانيوم الطبيعية أقل من 1% ، لذلك كان عزل ما يكفي من الأورانيوم الانشطاري ^{235}U الصرف (نحو 8 كيلوغرامات) واحداً من أهم الأهداف في الحرب العالمية الثانية لصنع أول قنبلة نووية . وقد وجد الفيزيائيون في أثناء عملهم في مشروعهم أن الأورانيوم 238 المتوفر ، على الرغم من عدم انشطاره ، يأسر نتروناً سريعاً ليكوّن به نظير الأورانيوم (^{239}U) ، وهذا بدوره سرعان ما يصدر أشعة بيتا (إلكترون وضديد النترينو) ليصبح النواة التي تأتي بعد الأورانيوم والتي هي في الحقيقة نواة النبتونيوم ، فيصدر هذا العنصر الجديد بدوره أشعة بيتا مرة أخرى ليصبح نواة بلوتونيوم الذي يصبح بعد امتصاص نترون بطيء على درجة عالية من قابلية الانشطار .

كان اكتشاف الانشطار النووي المحرَّض بوساطة النترون هو الخطوة الأولى في تطوير الطاقة النووية المفيدة التي تُوِّجت بإنشاء أول مفاعل نووي (أو ما يُعرف بالبيل الذري) تحت إشراف فرمي ، وقد ظلت الأسس النظرية التي بُني عليها المفاعل بسيطة جداً ؛ فإذا صنع مكعب كبير لدرجة كافية (مفاعل ذري) من ألواح الأورانيوم الصرف ، عندئذ تنطلق عملية الانشطار تلقائياً وتستمر من ذاتها مع إنتاج ثابت للطاقة ، والسبب في ذلك أن أي نترون خارجي ضال يدخل المفاعل يطلق العملية كيفما اتفق بسبب اصطدامه بنواة الأورانيوم وتمتصه أخيراً نواة الأورانيوم ^{235}U التي تنشطر وتولد نترونات إضافية . ويمكن إبطاء هذه النترونات بإضافة ألواح من الغرافيت في المفاعل إلى ألواح الأورانيوم ، فيمتص الأورانيوم ^{238}U النترونات السريعة لينتج البلوتونيوم ، ويمتص ^{235}U النترونات البطيئة ليبقي المفاعل مستمراً في عمله . ولكن المفاعلات النووية الحديثة تستخدم أسطوانات معبَّأة بقضبان من ^{235}U بدلاً من ألواح الأورانيوم الطبيعي ، مما يزيد كثيراً من معدل الطاقة المنتَجة .

فيزياء الجسيمات

«لقد وجدت لك برهاناً، ولكني لست مضطراً لأن أجد لك فهماً».

ـ صموئيل جونسون*

عندما اكتشف الفيزيائيون الإلكترون والبروتون في نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، كانوا ينظرون إلى هذين الجسيمين على أنهما مسك الختام لأنهم كانوا قد كافحوا، ولسنوات عديدة، لكي يكتشفوا هذين النوعين من الجسيمات اللذيْن يحملان شحنتين متعاكستين ومتساويتين، ثم لأن هذين الجسيمين، كما كان يبدو لهم، هما كل ما كان يحتاجه بناء نظرية صحيحة للمادة. وقد حققت هذه الاكتشافات تماماً تجارب فرادي الكهركيمياوية المبكرة التي أشارت بوضوح تام إلى وجود وحدة أساسية للشحنة، وكذلك أعمال أنطون لورنتز النظرية المسلم بها عن نظرية «الإلكترون» في المادة والتي اقتضت وجود إلكترون حقيقي لكي تكون صالحة. ولكن سرعان ما تبين للفيزيائيين أن اكتشاف كلٍ من الإلكترون والبروتون لم يكن سوى بداية فرع جديد في الفيزياء يعرف باسم «فيزياء الجسيمات» بدلاً من أن يكون ختام البحث عن اللبنات الأساسية في بناء الطبيعة، وهو الهدف الذي ظل قائماً في العلم منذ زمن الذرّيين اليونانيين.

لقد بدأت فيزياء الجسيمات بصورة ما بتأملات ديموقريطس في طبيعة المادة وبنظريته الذرية، إلا أن اكتشاف الإلكترون والبروتون حوّل هذا التأمل إلى واقع؛ وما يدل على أن هذا الواقع هو حقاً بداية فيزياء الجسيمات، تلك الأسئلة العميقة التي أثارها الإلكترون والبروتون فيما إذا كان هذان الجسيمان هما كل الجسيمات الأساسية التي كان يبحث عنها الفيزيائيون أو أنه ما زال هناك جسيمات أساسية هي التي يتكون منها الإلكترون والبروتون، ثم إذا كان الإلكترون والبروتون

* Samuel Johnson (1709-1784) أديب وناقد إنكليزي، وضع قاموساً للغة الإنكليزية يعرف باسمه.

أساسيين على درجة واحدة من الأهمية في بنية المادة فلماذا كانت كتلة البروتون أكبر بكثير من كتلة الإلكترون ؟ أما أن الإلكترون والبروتون مختلفان بنيوياً فهذا ما يدل عليه إخفاق معادلة ديراك الموجية النسبوية في وصف البروتون وصفاً صحيحاً على الرغم من نجاحها في وصف الإلكترون ، فهي تعطي قيمة العزم المغنطيسي الصحيحة للإلكترون ولكن لا تعطيها للبروتون . ويتضح لنا هذا الفرق من أن معادلة ديراك تنطبق على شحنة كهربائية نقطية ، فهي لذلك تدل على أنه يمكن أن يعامل الإلكترون معاملة النقطة ، أما البروتون فلا يمكن ذلك . وهذا وضع غير مرضٍ أبداً ، لأنه يضعنا أمام لا تناظر غير مقبول في الطبيعة ، ويجعلنا نتساءل : إذا كان هذان الجسيمان حقاً الجسيمين الأساسيين اللذين يقومان بمثل هذه الأدوار المهمة في بنية المادة ، فلماذا كان من الضروري أن يختلفا كل هذا الاختلاف في بنيتهما ؟ تُرى ألن نكون أكثر رضى من الناحية الجمالية لو نظرنا إليهما معاً على أنهما ليسا أوليين وإنما مكونان من جسيمات هي أكثر أساسية ؟ إلا أن جميع المحاولات التي بذلت لبناء نموذج مقبول للإلكترون باءت بالإخفاق ، لذلك نعتقد حالياً أنه ليس سوى جسيم نقطي عديم البنية ، أما البروتون فليس كذلك .

وعندما كان الفيزيائيون معنيين في القسم الأول من هذا القرن ببناء نموذج صحيح للذرة لم يكن أي منهم يعير انتباهه إلى طبيعة الإلكترون أو حتى البروتون ، إلا أن الأسئلة عن بنيتهما بدأت تثير اهتمام النظريين حين أظهرت التجربة أن هناك مزيداً من أنواع الجسيمات . وكان اكتشاف بلانك لنظرية الكم (أو كم الفعل) قد أدى إلى إدخال الفوتون الذي كان أول جسيم عديم الكتلة (كتلته السكونية صفر) في الطبيعة ، كما أدخل معه مفهوم المثنوية (أي الاتصاف في آن واحد بالصفتين الجسيمية والموجية) الذي طبقه ميكانيك الكم على الإلكترون والفوتون . وكانت معاملة الفوتون بأنه جسيم وأنه كم الحقل الكهرطيسي بداية ما ندعوه « نظرية الحقل » ، وهي نظرية تُطبق الآن في كل فيزياء الجسيمات . ولا يتميز الفوتون عن الإلكترون والبروتون بأنه ليس له كتلة سكونية فحسب بل يتميز عنهما أيضاً بسبينه الذي يساوي وحدة السبين ($\frac{h}{2\pi}$ أو $\hbar$) بدلاً من نصف وحدة . فالفوتون هو بوزون (يخضع لإحصاء بوز) وليس فرميوناً (يخضع لإحصاء فِرمي) ومن هذه الخاصة تُستنتج صيغة بلانك في الإشعاع .

إن وجود الفوتون ، وهو جسيم عديم الكتلة والشحنة وسبينه يساوي الوحدة ، لا بد أنه أوحى إلى الفيزيائيين ، لاعتبارات تناظرية فحسب ، وجود جسيم عديم الكتلة والشحنة ، ويساوي سبينه نصف الوحدة ؛ ولكن إدخال جسيم جديد كان أمراً ممقوتاً جداً عند الفيزيائيين في السنوات الأولى من القرن العشرين ؛ ولم يفرض وجود جسيم كهذا إلا بالإكراه الشديد . وقد وجد هذا الوضع نفسه عندما افترض باولي وجود النترينو لكي ينقذ مبدأ انحفاظ الطاقة من هجمات نيلزبور العنيفة على هذا المبدأ . ومع ذلك كان باولي متردداً جداً حتى إنه اعتذر عن تسرعه عندما طرح فكرة غريبة

كهذه تقول بوجود جسيم جديد عديم الشحنة والكتلة ويساوي سبينه $\frac{\hbar}{2}$، وذلك كي يفسر الطيف المتصل لسرع الإلكترون في التفكك ـ بيتا. وقد بدأ رسالته إلى المشاركين في المؤتمر الذي عقد عام 1930 عن النشاط الإشعاعي كما يلي: «لقد عثرت مصادفة على مخرج يائس يتعلق بإحصاء نوى الذرتين N^{14} وLi^{6} الخاطىء، وكذلك بطيف بيتا المتصل (المستمر)، وهذا بغرض إنقاذ «قانون التناوب» في الإحصاء المذكور وقانون الطاقة ولكني لم أجرؤ حتى الآن على نشر أي شيء عن هذه الفكرة...».

وقد أُنزل النترينو إلى ساحة الجسيمات من دون أن يكون له دور محدد تماماً ولكنه أنقذ مبدأ انحفاظ الطاقة من الموت وأعطى الإحصاء الصحيح لعمليات التفكك بيتا؛ ولما كان سبينه يساوي $\frac{1}{2}$ فمن الجائز أن الطبيعة تستخدمه لتبدل إحصاء منظومةٍ ما من دون أن تبدل شحنتها الكهربائية أو كتلتها السكونية، ولا بد أن يسير النترينو، بسبب كتلته السكونية المساوية للصفر، بسرعة الضوء لكي يتفق مع نظرية النسبية الخاصة، ولكنه ما زال أكثرَ الجسيمات المعروفة غموضاً، ولا يُعرف شيء عن بنيته إطلاقاً. ثم إن النترينو لا بد أن يكون له تواتر معين بسبب طاقته، لأن نظرية الكم تقتضي أن تكون طاقته مساوية لجداء ثابت بلانك في تواتره، فتبعاً لمجرى التفكير هذا يكون للنترينوهات مجال غير محدد من التواترات، وبما أنها تتفاعل مع المادة تفاعلاً ضعيفاً جداً فإن معظم ما كان منها موجوداً عند بداية العالم (الانفجار العظيم) لا يزال موجوداً.

وكان الجسيم الرابع الذي دخل في ساحة الجسيمات هو البوزترون (مضاد الإلكترون) الذي تنبأ به ديراك من معادلته الموجية النسبوية للإلكترون، ثم لاحظه كارل أندرسون في الأشعة الكونية فغيّر اكتشافه تغييراً كبيراً المفاهيم السابقة الراسخة عن الجسيمات الأولية لأنه أقنع الفيزيائيين بأن لكل جسيم جسيماً مضاداً له، مما ضاعف فوراً عدد الجسيمات الأولية. وتجدر الإشارة إلى أن لكلٍ من الجسيم ومضاده كتلة سكونية واحدة وسبيناً واحداً ولكن شحنتيهما الكهربائيتين متعاكستان. فهذه الصفات تعني أن كل جسيم يمكن أن يُخلق فجأة في جوار أي نقطة في الفضاء على أن يتكون معه مضاده أيضاً وأن تتوافر طاقة كافية، أو أن يكون هناك اضطراب مفاجىء قصير الأمد جداً في الخلاء. وجدير بالذكر أن الفوتون هو مضاد نفسه، أما الإلكترون والبروتون والنترينو فلها مضاداتها الخاصة المختلفة عنها.

وقد رأينا أن النترون جسيم تزيد كتلته زيادة طفيفة على كتلة البروتون، وكان قد اكتُشف في آن واحد تقريباً مع البوزترون ولكنه لا يشبهه لأنه مستقر نسبياً، ومن دونه لا يمكن أن توجد النوى. أما عبارة «مستقر نسبياً» فهي تعني أنه مستقر استقراراً تاماً داخل النوى التي لا تشع إشعاع بيتا، ولكن النترون يتفكك خارج النواة، كما ذكرنا سابقاً، إلى بروتون وبوزترون ونترينو مضاد في نحو $12 \frac{1}{2}$ دقيقة وسطياً، وهي المدة الزمنية التي تعرف بأنها عمر نصف النترون (إذ يتفكك

بهذه الطريقة نصف عدد معين من النترونات وفق التفكك بيتا كل $\frac{1}{2}$ 12 دقيقة). وللنترون أيضاً مضاده (ضديد النترون)، مثله مثل الإلكترون والبروتون. وحين يكون البوزترون في فضاء خالٍ تماماً فإنه يكون مستقراً كالإلكترون، أما حين يمر عبر المادة فإنه يتفانى مع أحد إلكتروناتها بطاقة متفجرة (ينبعث مكانهما شعاعا غاما)، ولذلك لا يصح من الناحية الفنية أن نقول إن عدم استقرار البوزترون مثل عدم استقرار النترون لأن البوزترون لا يتلاشى تلقائياً.

لقد أدرك الفيزيائيون بعد اكتشاف النترون أنهم أصبحوا على علم بكل الجسيمات الأساسية التي يحتاجونها لوضع نظرية كاملة عن بنية المادة بدءاً من النوى حتى الجزيئات؛ إذ بدا أن الأمور كلها اتسقت في ترتيب بديع حتى لقد تباطأ السعي إلى اكتشاف جسيمات جديدة بصورة ملحوظة قبل الحرب العالمية الثانية، إلا أن فيزياء الأشعة الكونية كانت تتسارع باستمرار، وقد أعلن علماء هذه الأشعة فيما بين عامي 1933 و1936 عن اكتشاف أشياء غريبة فيها هي جسيمات عالية الطاقة تدخل جو الأرض من كافة اتجاهات الفضاء حتى لقد بدا أن المنظومة الشمسية غارقة في بحر من الجسيمات السريعة الحركة (المشحونة وغير المشحونة)، والتي ظلت طبيعتها مجهولة إلى أن بُدىء بدراسة هذه الأشعة بطريقة فوتوغرافية وبوسائل اكتشاف التأين، إذ وضعت هذه الأجهزة داخل مناطيد أو في صواريخ أُطلقت إلى المناطق الخارجية من الجو الأرضي. وكان هناك، قبل إنجاز هذه التجارب، جدل قوي بين الفيزيائيين حول ما إذا كانت هذه الجسيمات النشيطة تنبعث من الأرض أم أنها تأتي من الفضاء بين النجوم؛ وقد حسم الجدل لصالح القائلين بأصلها الفضائي بين النجوم عندما انطلق الفيزيائي النمساوي فكتور هيس Victor Hess بنفسه في منطاد وأثبت نهائياً أن شدة الأشعة الكونية تزداد مع ازدياد الارتفاع فوق الأرض، أي بعكس ما كان سيحدث لو أن الأرض كانت مصدر هذه الأشعة، لذلك أطلق عليها الفيزيائي الأمريكي روبرت ميليكان R.Millikan اسم «الأشعة الكونية Cosmic rays» استناداً إلى هذه المشاهدات وظل هذا الاسم المناسب قائماً حتى الآن.

وقد قام ميليكان بأبحاث كثيرة حول هذه الأشعة وطرح نظريته فيها بأنها أمواج كهرطيسية (أشعة غاما) تتولد في مناطق المجرات البعيدة نتيجة عمليات غير واضحة يتم فيها تحويل المادة إلى طاقة. ولكن هذه الفكرة لم تلق القبول أبداً واستُبعدت مرفوضة رفضاً قوياً حتى من ميليكان نفسه بعدما تبين بوضوح، من دراسة مسارات هذه الأشعة في غرفة الضباب الموضوعة داخل حقل مغنطيسي، أن هذه الأشعة تتألف من جسيمات عالية الطاقة مشحونة كهربائياً، ثم كشفت الدراسات الأكثر تفصيلاً أن هذه الأشعة الكونية تتألف من فئتين: 1- فئة الأوليات وهي تنشأ في الفضاء بين النجوم أو بين المجرات، وتتألف من بروتونات عالية الطاقة (تتجاوز طاقتها التريليونات من الإلكترون فولت)، وكذلك من نوى ثقيلة؛ 2- فئة الثانويات وتتولد بتأثير الأوليات في الجو

الأرضي ، إذ إن تصادم أحد المكونات الأولية مع نواة جوية يمكن أن يولد وابلاً من آلاف عناصر الفئة الثانوية التي يمكن أن نعثر بينها على مختلف أنواع الجسيمات القصيرة الأجل ؛ وهكذا افتتحت هذه الفئة الثانوية حقلاً جديداً كاملاً للبحث والاكتشاف في فيزياء الجسيمات .

وكان أول اكتشاف مهم بين الجسيمات الجديدة (غير اكتشاف البوزترون) هو ما حققه أندرسون (مكتشف البوزترون) مع نيدرْمَير Neddermeyer ، فقد لاحظا بين عامي 1934 و1935 أن لبعض الأشعة الكونية الثانوية المشحونة قدرة عالية جداً على الاختراق ، وقد أمكنهما أن يقدرا منها أن الكتلة السكونية لأي من هذه الجسيمات تزيد على 100MeV ؛ فكان هذا الاكتشاف مروّعاً إلى أقصى حد ، إذ إن الفيزيائيين لم يستطيعوا إيجاد طريقة لإدراج هذا الجسيم بالصورة المناسبة في المخططات التي يتصورونها للأشياء ونماذج المادة . وقد قيست فيما بعد الكتلة السكونية لجسيم كهذا بدقة فوجد أنها 105,57MeV (أي نحو 200 ضعف من كتلة الإلكترون) ، كما وجد أن له شحنة سالبة وأن سبينه يساوي $\frac{1}{2}$ (أي إنه فرميون) ، وهو يتفكك إلى إلكترون ونترينو ونترينو مضاد بعد حياة تبلغ جزأين من مليون جزء من الثانية ؛ فكان هذا الجسيم الأوَل بين سلسلة من الجسيمات القصيرة الأجل جداً التي وجدت في الأشعة الكونية أو أُنتجت في المسرّعات العالية الطاقة . وقد دعي هذا الجسيم الخاص « ميزون ـــ مو » mu-meson ، وتعني الكلمة meson أن كتلة الميزون تشغل مكاناً وسطاً بين الإلكترون والبروتون .

وكانت كتلة « الميزون ـــ مو » مثيرة للجدل بين فيزيائيي الجسيمات ولا سيما النظريين منهم ، لأنهم كانوا يتطلعون إلى تفسير القوة النووية (الشديدة) بدلالة حقلَ قوة كمومي ، وقد دار الجدل عما إذا كان للقوة الشديدة كمومها التي تحمل (تنقل) حقلها والتي افترضوا أن تكون « الميزونات مو » ، تماماً كالقوة الكهرطيسية التي تحملها (تنقلها) كموم الحقل الكهرطيسي (الفوتونات) ، والقوة الثقالية تحملها الغرافيتونات (أي كموم الحقل الثقالي التي لم تشاهد بعد أبداً) .

ويرجع السبب في افتراضهم هذا إلى أعمال النظري الياباني هيديكي يوكاوا Hideki Yukawa الذي استخدم في عام 1935 حججاً عامة من ميكانيك الكم ليثبت أنه إذا كان مدى قوة الحقل قصيراً فلا بد عندئذ من أن تكون كتلة كمومها السكونية غير الصفر ، وكلما قصر مدى القوة ازدادت كتلة كمومها ؛ وهكذا فإن القوى التي مداها لا نهائي ، مثل الثقالة والكهرطيسية ، تحملها كموم كتلتها السكونية صفر وهي الغرافيتونات والفوتونات . وقد استنتج يوكاوا من قياس مدى القوة بين نكليونين (الذي دلت عليه تجارب التبعثر) أن كم هذه القوة يجب أن يكون أكبر من كتلة الإلكترون بـ 200 مرة ، فلا عجب إذاً إذا قبل فيزيائيو الجسيمات في بداية الثلاثينيات بحماس أن يكون « ميزون ـــ مو » هو كم يوكاوا الحامل للقوة الشديدة . ولكن دراسة خواص الميزون ـــ مو بعناية أثبتت أنه ليس على الإطلاق كماً لحقل قوة (أي حاملاً للقوة الشديدة) وإنما هو فرميون

بكل معنى الكلمة كالإلكترون .

ولكي يتضح هذا الأمر دعونا نصف تصور يوكاوا للتفاعل بين نكليونين (بروتون ـــ بروتون ، بروتون ـــ نترون ، نترون ـــ نترون) ؛ ففي كل تفاعل من هذه التفاعلات يتبادل الجسيمان المتفاعلان ، بحسب نظرية يوكاوا ، كموم الحقل الثقيلة أي : 1- القوى في الحالات الثلاث المذكورة أعلاه متساوية ، 2- يمكن أن يتبادل النكليونان المتفاعلان شحنتيهما ولكن يجب ألا تتغير الشحنة الكلية ، 3- يجب أن تمتص النكليونات كم الحقل الشديد بقوة .

والآن ، يمكن أن نتصور طريقة التفاعل بين نكليونين ، في حال الحقل القوي حين يكون كل منهما في مدى الآخر ، على النحو التالي : يصدر كل نكليون في الحال كموماً افتراضية فيمتص النكليون الآخر أحدها بسرعة ، وهكذا يتفاعل النكليونان بشدة بأن يتقاذفا كموم الحقل فيما بينهما ، وهذا يعني أنه يجب أن توجد ثلاثة أنماط من هذه الكموم لكي تفسر تساوي القوة الشديدة بغض النظر عن شحنات النوى (إذ لا علاقة لشحنتها بالقوة الشديدة) ، وهذه الأنماط شحناتها +1 وصفر و-1 وكتلها متقاربة جداً . أضف إلى ذلك أن هذه الكموم يجب أن تمتصها النكليونات بشدة كما يجب أن تكون سبيناتها وحدات صحيحة مثل 0 أو 1 ، وليس نصف وحدة ، وهذا يعني أنها يجب أن تكون بوزونات يتم امتصاصها بشدة وليس فرميونات يتم امتصاصها بضعف . ولكن الميزونات ليس لها أي واحدة من هذه الميزات ، فهي تمر في المادة متفاعلة مع النكليونات بضعف فحسب من دون أن تنحرف ، كما لا يوجد سوى « ميزونات ـــ مو » مشحونة بشحنات موجبة أو سالبة ، وهي فرميونات سبينها يساوي $\frac{1}{2}$ ؛ فلهذه الأسباب سميت « الميزونات ـــ مو » اليومَ « ميونات muons » ، واحتفظ بالتسمية « ميزون » للجسيمات التي اكتشفت مؤخراً والتي تتفق خواصها مع متطلبات كموم يوكاوا ، وتعد الميونات اليوم إلكترونات ثقيلة غير مستقرة ولا يعرف معظم فيزيائيي الجسيمات سبباً لوجودها الذي فيه من الغموض الشديد مثلما كانت عليه عند اكتشافها ، إذ يبدو أنها لا دور لها في المخطط الذي تصوره فيزيائيو الجسيمات للأشياء ، بل لو أنها كانت غير موجودة لأمكن للعالم أن يستمر على وضعه كما كان ، حتى ليتساءل كثير من الفيزيائيين لماذا خلقت الطبيعة جسيماً يبدو أنه غير ضروري . ولكن هذه النظرة قاصرة لأن وجود الميون يقتضيه وجود الإلكترون فيما لو تصورنا نظرياً أن الميون حالة إلكترون مثار . فكما يؤدي وجود ذرة الهدروجين إلى حالات مثارة لهذه الذرة عندما تمتص فوتوناً ، كذلك الإلكترون ، مثله مثل البنية المركبة غير المثارة في الحالة الدنيا ، يقتضي وجود حالة مثارة لهذه البنية هي الميون الذي يتولد من امتصاص نترينو .

وقد اقتنع الفيزيائيون التجريبيون بصحة نظرية يوكاوا في القوة النووية فأخذوا يواصلون بحثهم في الأشعة الكونية عن ثلاث جسيمات يكون لها بالتحديد ما لكمٍّ يوكاوا من سبين وكتلة وشحنة

وتتفاعل مع النكليونات ، وقد وجد سيسيل فرانك باول Cecil Frank Powel ومساعدوه بين عامي 1946 و1947 مجموعة كهذه في الأشعة الكونية شحناتها -1 ,0 , +1 وسبينها صفر ، كما تبين أن لهذه البوزونات الثلاثة ، التي دُعيت ميزونات ـ بي Pi-mesons أو بيونات Pions ، كتلاً تكاد تكون متساوية وتبلغ نحو 140MeV ، وأن النكليونات تمتصها بشدة ؛ لذلك قبل فيزيائيو الجسيمات بأنها هي حوامل القوة النووية . وقد استنتج يوكاوا ، باستخدام هذه البوزونات ، صيغة رياضية تعطي علاقة التفاعل بين نكليونين بالمسافة بينهما تشبه صيغة كولون في التفاعل الكهراكدي ، مضروبة بعامل تابع أسي للمسافة لكي يجعل مدى هذا التفاعل قصيراً ، غير أن هذه الصيغة لا تعطي نتائج أفضل مما أعطته الصيغ التجريبية المختلفة التي استخدمت من قبل ، لذلك لا يمكن أن يقال إن نظرية البيونات في القوة النووية قد أعطتنا في هذا المجال نظرية أعمق مما كان لدينا سابقاً .

وقد لوحظ أن حياة البيون المشحون (π^+ أوπ^-) قصيرة جداً (يقرب عمر نصفه من جزء من مئة مليون من الثانية) ، وهو يتفكك إلى ميون مع إطلاق نترينو ، ويتفكك أحياناً إلى إلكترون (أو بوزترون بحسب شحنته) مع إطلاق نترينو أو نترينو مضاد . أما البيون الحيادي (π^0) فيتفكك إلى شعاعي غاما في زمن أقصر بكثير من تفكك البيونين المشحونين . وقد اتخذ من غزارة تولد البيونات عند تصادم نكليونين دليلاً آخر لدعم فرضية يوكاوا في أن البيونات هي حوامل القوة (النووية) الشديدة .

وقد أمكن استخدام عمر البيون والميون سنداً تجريبياً قوياً لدعم استنتاج أينشتاين (من نظريته الخاصة) ، وهو أن ضربات الميقاتية تتباطأ بالنسبة للمراقب كلما سارت بسرعة أكبر بالنسبة إليه . وقد تم التحقق من ذلك عندما لوحظ أنه كلما ازدادت بالنسبة إلى مراقب سرعة البيون أو الميون طالت مدة حياته على ميقاتية المراقب ، لذلك فإن المقصود من عمر البيون أو الميون هو ما يقيسه المراقب حين يكون هذان الجسيمان في مرجعه الخاص .

وقد أدى اكتشاف البيون والتسليم بأنه الميزون الحقيقي إلى القيام بأول خطوة في تصنيف الجسيمات في فئتين متمايزتين تعرفان بميزاتهما الخاصة . والحقيقة أنه كان هناك ، حتى قبل اكتشاف البيون والميون ثلاث فئات معروفة وهي الجسيمات الثقيلة التي سبينها $\frac{1}{2}$ (النترون والبروتون) ، والجسيمات الخفيفة التي سبينها $\frac{1}{2}$ (الإلكترون والنترينو) والفوتون الذي سبينه 1 وكتلته السكونية صفر . غير أن هذه الجسيمات لم توزع على فئات مختلفة في ذلك الوقت لأن هذا العمل لم يكن يؤدي في حينه إلى تبسيط الفيزياء تبسيطاً حقيقياً أو إلى فهمها فهماً أعمق . ولكن ترتيب هذه الجسيمات في فئات أصبح ، عند اكتشاف البيونات والميونات ، يوحي بأنه طريقة في إظهار نوع من النظام في دنيا الجسيمات.إذ جملة الجسيمات المكتشفة حديثاً والمتزايدة العدد باستمرار كانت تزداد وضوحاً واكتمالاً .

وكانت السبينات والكتل هي أولى الخواص المميزة التي استخدمت في تقسيم الفئات فجعلت جميع الجسيمات التي سبيناتها تساوي نصف عدد فردي من وحدة السبين $\hbar$ في فئة واحدة وسميت فرميونات (كالإلكترون والبروتون والنترون والميون والنترينو وجسيماتها المضادة)، كما جعلت الجسيمات التي يساوي سبينها عدداً صحيحاً 1 ,0 ,2 (أي على التوالي: الفوتونات والميزونات والغرافيتونات) في فئة واحدة سميت البوزونات. وفي حين أن الفرميونات هي لبنات بناء المادة كافة (الذرات والجزيئات) فقد افتُرض أن البوزونات هي حوامل حقول القوة بين الفرميونات.

وقد قسمت الفرميونات أيضاً إلى فئتين متمايزتين: الفرميونات الثقيلة وتدعى «باريونات» (وهي النكليونات والجسيمات الأخرى الأثقل منها التي اكتشفت حديثاً والفرميونات الخفيفة وتدعى «لبتونات». وعندما كان عدد الباريونات المنبثقة في المسرعات العالية الطاقة يزداد باستمرار وجد أن سبين بعضها يساوي $\frac{3}{2}$، لذلك كان من المناسب تقسيمها إلى فئتين أيضاً: فئة باريونات سبينها $\frac{1}{2}$ وفئة باريونات سبينها $\frac{3}{2}$ (وطبيعي أن كلا الفئتين فرميونات). كما وجد تعقيد آخر في شحنات الباريونات الكهربائية فكل باريونات السبين $\frac{1}{2}$ شحناتها 0 أو+1 أو-1 أما باريونات السبين $\frac{3}{2}$ فشحناتها +2 أو+1 أو0 أو-1، هذا مع مراعاة أن كل جسيم له مضاده، ولم يكن لهذا التنظيم معنى في بادئ الأمر ولكن بوادر النظام أخذت تظهر مع الزمن عندما أُدخل مفهوم «الكوارك» الذي سندرسه فيما بعد في هذا الفصل.

وتتألف اللبتونات (التي هي كلها ومضاداتها من جسيمات السبين $\frac{1}{2}$) من فئتين: فئة الجسيمات المشحونة وهي مثل الإلكترون، بغض النظر عن كتلها، وفئة الجسيمات غير المشحونة مثل النترينو الذي كتلته السكونية صفر. وتضم أولى هاتين الفئتين الإلكترون والميون (الذي كتلته 105MeV) واللبتون تاو τ (tau) الذي كتلته 1784,2MeV، أي ضعفا كتلة البروتون تقريباً، الأمر الذي يثبت أننا نخطىء إذا ظننا أن اللبتونات كلها خفيفة مثلما يوحي بذلك اسمها الخدّاع lepton (وهي كلمة مشتقة من اليونانية تعني خفيف). وقد عثر فيزيائيو الجسيمات على ثلاثة أنواع من النترينو هي: النترينو العادي الذي يظهر في التفكك ـــ بيتا ويدعى نترينو إلكتروني؛ والنترينو الذي يطلقه البيون عندما يتفكك إلى ميون ويدعى نترينو ميوني؛ والنترينو الذي يطلقه اللبتون تاو (τ) عندما يتفكك. وقد أصبح من المسلم به أن وجود ستة لبتونات لا غير هو من السمات الأساسية في عالم الجسيمات. ولكن تخصيص كل لبتون بنترينو هو من الأمور الغريبة الغامضة في فيزياء الجسيمات الحديثة، ذلك لأنه لما كانت النترينوهات كلها تسلك سلوكاً واحداً، فيما يتصل بسبيناتها وكتلها السكونية المساوية للصفر (سرعتها هي سرعة الضوء) وعلاقة اتجاه سبيناتها باتجاه سرعها، فإنه يصعب أن نعزو أي معنى فيزيائي لهذا التمييز بين النترينو الإلكتروني والنوعين الآخرين

للنترينو ؛ ولكن هذا التمييز تم عندما اكتشف المجربون أن الميونات تتفاعل مع النترينوهات المنطلقة من البيونات ولكنها لا تتفاعل مع النترينوهات المنطلقة عند التفكك بيتا . ومع ذلك ، لم يتم حتى الآن التحقق تجريبياً من أن اللبتون تاو له نترينو خاص به . أما التمييز تجريبياً بين النترينو الميوني والنترينو الإلكتروني فيعود إلى الخمسينيات عندما أثبت ل . م . شفارْتز L.M.Schwartz و ج . شتينبرغر J.Steinberger (اللذان نالا جائزة نوبل عام 1988) أن النترينوهات الصادرة عن البيونات تتفاعل مع البروتونات لتوليد نترونات وميونات ولكنها لا تولد أبداً نترونات وبوزترونات .

أما الميزونات فهي بوزونات سبينها عدد صحيح وشحناتها + 1 أو0 أو-1 وتتدرج كتلها من كتلة البيونات (140MeV) إلى أكثر من 10000MeV (أو 10GeV) وتتولد هذه الميزونات الثقيلة في المسرعات القوية جداً المستخدمة في بلدان مختلفة ، إلا أن وجود هذه الميزونات الثقيلة يثير سؤالاً مهماً جداً بشأن دورها في هذا الكون ، إذ إن البيونات ــ وهي أخف الميزونات كتلة ــ إذا كانت هي التي تحمل القوة النووية فلماذا توجد ميزونات أخرى ؟ قد يكون الجواب أنها جميعاً حالات مثارة للبيونات ، ولكن إذا كان الأمر كذلك فلماذا لا تكون البيونات نفسها حالات مثارة لجسيم لا يزال في حالة طاقة هي أخفض من حالة البيونات (أي في حالة هي أدنى ما يمكن لطاقة المادة) ؟ وهذا سؤال مهم لأن الظواهر الذرية والنووية كلها ، توجد فيها منظومات مثارة تتفكك إلى أدنى حالة طاقة ممكنة .

وحين أنشئت المسرعات العالية الطاقة جداً التي تسرّع الجسيمات المشحونة حتى طاقة تبلغ مئات المليارات من الإلكترون فلط لم تعد الأشعة الكونية المصدر الأول للجسيمات الجديدة ، ومع ذلك لم ينشأ بعد ذلك المسرع الذي تتجاوز فيه طاقة الجسيمات أعلى طاقة وجدت في الأشعة الكونية ، أي 10 مليارات جيغا إلكترون فلط ، لذلك لا تزال الأشعة الكونية المصدرَ الذي يجب أن نبحث فيه عن جسيمات جديدة ذات طاقة عالية جداً جداً (أي كتلتها السكونية كبيرة إلى أقصى حد) هذا لو وجدت أصلاً ، ولكن عيب البحث عن جسيمات كهذه هو أنه يجب أن تفحص بكل عناية مئات الآلاف من صور آثار الأشعة الكونية لكي يعثر فيها على أثر نادر ، في حين يمكن تصميم مسرعات لتوليد العديد من الجسيمات التي لها على وجه الضبط الطاقةُ التي تهمنا . ومهما يكن من أمر ، فقد اكتشف منذ الخمسينيات رتل مذهل (بعدده ونوعيته) من الجسيمات الجديدة سواء في الأشعة الكونية أو في المنتجات المتولدة في المسرعات من اصطدام الحزم الأولية للجسيمات ذات الطاقة العالية بحواجز ثابتة أو متحركة . وقد تمكن فيزيائيو الجسيمات النظريون من أن يوجدوا شيئاً من النظام في هذه الفوضى الشاملة بأن رتبوا هذه الجسيمات لا في الفئات الثلاث التي سبق ذكرها فحسب بل أيضاً في مجموعات متفرعة عن هذه الفئات الرئيسية ، وكانت الفكرة هي محاولة تنظيم جدول بالجسيمات المتشابهة على طريقة جدول مندلييف للعناصر الكيمياوية (أي جدول

بالنوى ونظائرها) ، إلا أنه تبين مباشرة أن هناك فارقاً بين جدول مندلييف وجدول الجسيمات الذي كانوا يودون تنظيمه ليشمل جميع الجسيمات العالية الطاقة التي سرعان ما انبثقت عن المسرعات الجديدة ، إذ إن جميع النظائر النووية في جدول مندلييف تتألف من نوعين من الجسيمات الأساسية وهما النترونات والبروتونات في حين أن الباريونات كلها (أي النكليونات وجميع الباريونات الثقيلة) والميزونات كلها (أي البيونات وجميع الميزونات الثقيلة) لا يمكن أن تُبنى بنوعين فحسب من أبسط الجسيمات المكونة ، بل لا بد من ثلاثة جسيمات كهذه أو أكثر ؛ لذلك سنصف فيما يلي كيف تم إدخال مثل هذه الجسيمات الأساسية ، ولكننا سنشير قبل القيام بذلك إلى بعض القواعد التجريبية التي انكشفت في سلوك الجسيمات العالية الطاقة المكتشفة حديثاً ، إذ يبدو أن هذه الجسيمات الأساسية تخضع لقواعد انحفاظ يجب أن تضاف إلى مبادئ الانحفاظ الديناميكية مثل مبدأ انحفاظ الطاقة ـــ الاندفاع ـــ الكتلة ومبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي اللذيْن قاما بدور هام في فهمنا للظواهر الطبيعية .

وأهم مبادئ الانحفاظ الإضافية هذه هي : انحفاظ الشحنة الكهربائية وانحفاظ العدد الباريوني وانحفاظ العدد اللبتوني ؛ ففي التفاعلات الجسيمية كافةً يجب أن تظل الشحنة الكهربائية الكلية بعد التفاعل مساوية للشحنة الكهربائية الكلية قبل التفاعل وهذا بغض النظر عن نوعية هذه الجسيمات سواء أكانت باريونات أم لبتونات أم بوزونات أم خليطاً من هذه الجسيمات ، أي لا يمكن أن تُخلق الشحنة الكهربائية ولا أن تباد ، فإذا ظهر بعد التفاعل جسيم جديد يعطي زيادة في الشحنة +1 علاوة على الشحنة الابتدائية فعندئذ يجب أن يظهر معه فوراً جسيمه المضاد الذي شحنته -1 .

ويظهر لنا انحفاظ العدد الباريوني من ملاحظة أن الباريونات تتفكك إلى باريونات فحسب بالإضافة إلى جسيمات أخرى ؛ فكل باريون يعزى إليه عدد باريوني هو عدد النكليونات بالتحديد (النترونات والبروتونات) التي يمكن أن يتفكك إليها تلقائياً ، ولكن العدد الباريوني لجميع الباريونات المعروفة هي +1 لأنها جميعاً تتفكك في النهاية إلى بروتون أو نترون ، والعدد الباريوني للنترون نفسه هو +1 ؛ فانحفاظ العدد الباريوني يعني أن البروتون مستقر استقراراً مطلقاً لأنه لو اختفى لتحول العدد الباريوني من +1 إلى الصفر ، وهذا غير جائز ولكن من الجائز أن يكون مبدأ الانحفاظ هذا على درجة عالية جداً من التقريب ولا تخضع له التفاعلات خضوعاً مطلقاً ، بمعنى أن عمر البروتون طويل جداً ولكنه ليس لا نهائياً كما استُدل من إحدى نظريات التوحيد الكبير الشائعة وإن يكن هذا الأمر غير مدعوم بأي دليل مؤكد . والعدد الباريوني للباريون المضاد هو -1 ؛ وهكذا ينص انحفاظ العدد الباريوني على أن العدد الكلي للباريونات (أي المجموع الجبري لأعداد الباريونات ومضاداتها في المنظومة) بعد التفاعل يجب أن يساوي العدد الكلي للباريونات قبل التفاعل ، أي لا يمكن أن تخلق الباريونات ولا أن تباد ، وإذا ظهر باريون إضافي بعد التفاعل فلا بد أن يظهر معه فوراً باريون مضاد

لكي يبقى العدد الباريوني نفسه . وليست الميزونات والفوتونات منحفظة في مثل هذه التفاعلات ، وهكذا فإن الباريون الأثقل من البروتون يمكن أن يتفكك إلى بيون (ميزون) وإلى بروتون أو نترون من دون أن يخل بأي مبدأ انحفاظ ، فيمكن للباريونات أن تتفكك أيضاً إلى باريونات أخرى مع فوتونات أو أن تتفكك إلى باريونات مع فوتونات وميزونات .

وتحافظ جميع التفاعلات أيضاً على عدد اللبتونات الكلي . والمقصود باللبتونات الإلكترونات والنترينوهات والميونات وجسيمات أخرى . أما العدد اللبتوني لجسيم فهو عدد الإلكترونات والنترينوهات التي يمكن أن يتفكك إليها الجسيم ، فالعدد اللبتوني للإلكترون وكذلك للنترينو هو +1 (عددهما الباريوني صفر) ، والعدد اللبتوني لأي ميزون هو صفر ، ولكن العدد اللبتوني للميون هو +1 ، والعدد اللبتوني للبوزترون هو -1 . وهكذا ينص مبدأ انحفاظ العدد اللبتوني على أن العدد اللبتوني الكلي لفئة من الجسيمات والجسيمات المضادة المتفاعلة يجب أن يكون بعد التفاعل مساوياً لما كان عليه قبل التفاعل ، والأمثلة القليلة التالية توضح فائدة مبادئ الانحفاظ هذه .

فالعدد الباريوني للنترون قبل أن يتفكك هو +1 وعدده اللبتوني هو صفر فانحفاظ العدد الباريوني يعني أن النترون يجب أن يتفكك إلى بروتون ، كما يعني انحفاظ الشحنة الكهربائية أن البروتون يجب أن يرافقه إلكترون ، ولكن ظهور البروتون والإلكترون وحدهما بعد التفكك يخرق انحفاظ العدد اللبتوني ، ولذلك يظهر معهما بعد التفكك لبتون مضاد هو النترينو المضاد . ولدينا مثال بسيط آخر هو تفكك البيون المشحون الذي هو أيضاً مثال واضح على مبادئ الانحفاظ ، إذ يتفكك البيونان π^+ وπ^- (وعددهما اللبتوني صفر) إلى ميونين μ^+ وμ^- على الترتيب (العدد اللبتوني للميون +1) ؛ ولكن هنا أيضاً يظهر في كل تفكك كهذا نترينو مضاد يحفظ العدد اللبتوني (لأن العدد اللبتوني للنترينو المضاد هو -1) .

وقبل أن نترك مبادئ الانحفاظ دعونا نتأمل بشيء من التفصيل مبدأ حفظ الطاقة ـــ الكتلة عند تفاعل الجسيمات وتفككها . ومع ذلك لنلاحظ أولاً قصور أو إخفاق مبدأ معين من مبادئ الحفظ هو حفظ المماثلة (أو الزوجية) Parity الذي كان يظن قبل اكتشاف النترينو أنه صالح عموماً ، إلا أن النترينو أظهر أن حفظ المماثلة لا ينطبق على العمليات التي تكون فيها النترينوهات ممتصة أو صادرة (أي العمليات التي يكون فيها « تفاعل ضعيف ») . وينتج مفهوم المماثلة من تحليل الطريقة التي نتبعها في مقارنة وصف الحوادث في العالم الواقعي بما تبدو عليه في صورة مرآتية لهذا العالم ، ويبدو للوهلة الأولى أن هذه الفكرة لا تخلق أي صعوبة ولا تثير أي مشكلة لأن كل ما تفعله المرآة هو تبديل الظواهر اليمينية إلى ظواهر يسارية والعكس بالعكس ، لذلك علينا أن نتوقع أن صورة قوانين الطبيعة في المرآة هي نفسها كما تبدو في العالم الواقعي ، فوفقاً لوجهة النظر هذه ، لا يوجد حادث يمكنه أن يجعلنا نعرف من صورته في المرآة أن ما نراه هو صورة العالم المنعكسة ؛ ويدعى هذا

المفهوم « مبدأ انحفاظ المماثلة » وهو يبدو معقولاً تماماً لأننا لا نرى سبباً يجعل قوانين الطبيعة تختلف في الظواهر اليمينية عنها في الظواهر اليسارية ، ويمكن أن تعرَّف مماثلة منظومة أو ظاهرة في الفيزياء الحديثة بعبارة دالة الموجة التي تصف هذه المنظومة أو الظاهرة . وما دالة الموجة سوى تعبير رياضي يتعلق بالمرجع (أو جملة الإحداثيات) الذي نستخدمه في وصف الحوادث ، فإذا غيرنا الآن هذه الجملة بقلب اتجاه أحد محاورها الثلاثة حصلنا عندئذ على ما يعادل رؤية هذه الحوادث في مرآة ، وتدعى عملية تحويل المحور هذه « انعكاساً » ، فالسؤال الذي يتبادر إلى الذهن عندئذ من وجهة نظر ميكانيكية هو التالي : ما الذي يحدث لدالة الموجة التي تصف الحوادث عندما نغير جملة إحداثياتنا بهذه الطريقة ؟.

تظهر الحجج التي يقدمها ميكانيك الكم العام أن دالة الموجة إما أن تبقى إشارتها من دون تبديل ، وفي هذه الحالة نقول عن مماثلة المنظومة أو الظاهرة إنها « موجبة » (أو شفعية) وإما أن تتغير إشارتها ونقول عن المنظومة أو الظاهرة عندئذ إنها « سالبة » (أو وترية) . وقد اكتشف الفيزيائيون أن كلا نوعي المماثلة يظهران في الطبيعة بصورة طبيعية تماماً ولكن لم يلاحظ قط قبل اكتشاف ظاهرة النترينو والتفاعلات الضعيفة ، بوجه عام ، أي تغيير في المماثلة من شفعية إلى وترية أو بالعكس ؛ ولهذا السبب قال الفيزيائيون بمبدأ انحفاظ المماثلة الذي كان مقبولاً عموماً من دون استثناء إلى أن اكتشفت ظاهرةٌ معينة في سلوك فئة من الميزونات تدعى الميزونات k أثارت باكتشافها مسائل جدية عن مبدأ انحفاظ المماثلة ؛ فهذه الميزونات تتفكك إما إلى ميونيْن أو إلى ثلاثة ميونات . وقد اتضح من مماثلة الميزون k المحدَّدة ومماثلة البيونات الفردية أن المماثلة غير منحفظة في هذا التفكك لأن مماثلة البيونين شفعية في حين أم مماثلة البيونات الثلاثة وتريَّة .

وقد حار الفيزيائيون في أمر هذه الصعوبة ولم يعرفوا لها مخرجاً إلى أن أقدم الفيزيائيان الصينيان لي ويانغ **Tsung Dao Lee & Chen Ning Yang** واقترحا معاً أن المماثلة منحفظة في حال التفاعلات الكهرطيسية والقوية والثقالية ، أما في الضعيفة (أي التفاعلات التي تقوم بها الميزونات والنترينوهات) فلا تكون منحفظة . وقد تحققت س . وُو **S.Wu** تجريبياً فيما بعد من هذه الفرضية حين درست بكل عناية تفكك بيتا في نوى الكوبلْت ، إذ أظهرت تجربتها أن هذه النوى تطلق أشعة بيتا وتفضل لها اتجاهاً معاكساً لاتجاه سبينها هي نفسها ، بدلاً من أن تطلقها في هذا الاتجاه (أي اتجاه سبينها) ، وفي ذلك خرق واضح لمبدأ انحفاظ المماثلة لأن هذا اللاتناظر يعني أن صورة انطلاق الأشعة بيتا ، من نواة الكوبلْت ذات السبين ، في المرآة هي صورة مخالفة لعملية الإطلاق الحقيقة لأنها تتوقف على وضع متجه سبين النواة بالنسبة إلى المرآة (أهو موازٍ لها أم عمودي عليها) ، فالمرآة تقلب اتجاه السبين من دون أن تقلب اتجاه أشعة بيتا المنطلقة والعكس بالعكس .

كذلك فإن النترينو نفسه يثبت أن مبدأ انحفاظ المماثلة لا ينطبق عليه لأن اتجاه سبينه

بالنسبة إلى متجه سرعته ثابت، فالمراقب الذي يتقهقر النترينو بالنسبة إليه باستمرار يراه يلف بعكس عقارب الساعة في حين أن المراقب الذي يقترب النترينو منه يراه يلف مع عقارب الساعة. وهذا يعني أن النترينو يسير بسرعة الضوء وأن كتلته السكونية معدومة وإلا لكان باستطاعة المراقب أن يسير بسرعة كافية وأن يتجاوزه ليصبح متقهقراً بالنسبة إليه، وعندئذ سيبدو أن النترينو يلف مع عقارب الساعة أي بعكس طريقة التفافه حين يكون متقهقراً. أما في حالة النترينو المضاد فإن اتجاه سبينه ومتجه سرعته يتخذان في الحالين وضعاً نسبياً معاكساً للنترينو.

افرض الآن أن هناك نترينو يبتعد عنك (أي يلف بعكس عقارب الساعة) ويقترب من مرآة، فصورته في المرآة تظهره مقترباً منك في حين أن سبينه في هذه الصورة يبدو متجهاً بعكس عقارب الساعة أيضاً، ولذلك فإن صورةَ النترينو عندئذ في المرآة ليست نترينو وإنما نترينو مضاد ولهذا فإن العالم في صورته المرآتية لا يخضع للقوانين نفسها التي يخضع لها العالم الحقيقي؛ وهذا لا يعني أن صورة العالم في مرآة لا يمكن أن توجد بل إن عالماً كهذا يمكن في الحقيقة أن يوجد ولكنه يكون عالماً تستبدل فيه الجسيمات المضادة بالجسيمات نفسها، وفيما عدا ذلك تظل القوانين كلها على حالها، أما على الصعيد الذري فيبدو الزمن معكوساً لأن البوزترون يتصرف كأنه إلكترون يرحل من المستقبل إلى الماضي.

لنعد الآن إلى انحفاظ الكتلة ــ الطاقة في حال تفاعل الجسيمات وتفككها. فما يتصل بالتفاعل سبق أن دُرس دراسة واسعة قبل أن تتطور فيزياء الطاقة العالية إلى تعقيدها الراهن، كما أن مبادئ الانحفاظ الأساسية، أي انحفاظ الشحنة والسبين والطاقة التي تضبُط سير هذه التفاعلات، كانت تعرف معرفة جيدة، ولكن تبادلات الطاقة في ظواهر كهذه تكون صغيرة نسبياً إذا قورنت بالكتل السكونية للنظم المعتبرة؛ أما في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة فتغيرات الطاقة تكون هي نفسها كبيرة مثل الكتل السكونية المعتبرة، فكيف يطبق إذاً مبدأ انحفاظ الكتلة ــ الطاقة في هذه الحالة ليكون مرشداً يدلنا على الاتجاه الذي ستسير فيه الظاهرة التي تتضمن تفاعلات بين الجسيمات أو يتفكك جسيم بمفرده؟ لكي تتضح الأمور وتكون محددة، دعونا نفترض أن A يمثل حالة جسيم مفرد (باريون ساكن)، وB يمثل حالة نواتج تفكك A ــ أي أن B يمثل مجموعة جسيمات (باريونات وفوتونات وميزونات ولبتونات) طاقتها الكلية (أي طاقتها الحركية بالإضافة إلى كتلها السكونية) تساوي كتلة A بحسب مبدأ انحفاظ الكتلة ــ الطاقة؛ ولما كانت طاقة الكتلة الابتدائية تساوي طاقة الحالة النهائية، فلماذا تحدث العملية أصلاً، ما دامت الطاقة منحفظة سواءً أحدثت العملية في الاتجاه A ← B أم في الاتجاه المعاكس B ← A؟ إن العامل الحاسم في العملية هو كتلة A السكونية بالمقارنة مع كتلة الباريون السكونية وهو في الحالة B، إذ إن الباريون سيتفكك دائماً إلى باريونٍ آخر كتلته السكونية أصغر، وهكذا فإن الطاقة المنطلقة (أي الفرق بين كتلتي

الباريونين) تظهر على صورة طاقة حركية في الباريون النهائي بالإضافة إلى الطاقات الحركية للميزونات واللبتونات واللبتونات المضادة وكتلها وإلى طاقة الأشعة غاما المتولدة من هذا التفكك ، وهكذا فإن أنتروبية الحالة B النهائية هي أكبر من أنتروبية الحالة A ، وبذلك يكون قانون الترموديناميك الثاني هو العامل الحاسم في العملية ، إذ إن الأنتروبية يجب أن تزداد لكي تجري العملية . ولما كان النترون أثقل قليلاً من البروتون فهو لذلك يتفكك تلقائياً إلى بروتون وإلكترون ونترينو مضاد ، وهذاالتفكك يمثل تزايداً في الأنتروبية .

وقد كانت هذه الأمور في بداية الخمسينيات من هذا القرن مفهومة فهماً حسناً حين لوحظت بعض الأحداث في الأشعة الكونية العالية الطاقة وفي المسرعات الضخمة إذ اكتشفت بالإضافة إلى البيونات والميونات (الميزونات واللبتونات) ، التي تَبين أنها من مكونات الأشعة الكونية ، فصائل جديدة من الباريونات الثقيلة جداً التي بدت بسبب بعض خواصها الغريبة لغزاً محيراً ؛ وفي مثل هذه الحالة يحاول الفيزيائيون ترتيب هذه الجسيمات الجديدة غير المألوفة في فئات طبقاً للخواص التي يعرفونها مثل الكتلة والسبين والشحنة والمماثلة . ثم اكتشفت في أواخر الخمسينيات وبداية الستينيات جسيمات هي مبدئياً طراز جديد من الباريونات الثقيلة (تراوح كتلها بين كتلة البروتون وما يقارب ثلاثة أمثال كتلته) ، وقد نظّمت هذه الجسيمات نفسها بصورة طبيعية في فئة من ثمانية باريونات سبينها $\frac{1}{2}$ (هي الثمانية Octet) ، وفي فئة من عشرة باريونات (من التي كتلها أكبر) سبينها $\frac{3}{2}$ (هي العشارية decimet) ؛ وكان كل من هذه « العدودات الفائقة » supermultiplets كما سميت ، يتألف من فئات فرعية رُتبت وفقاً لشحنتها الكهربائية وكتلتها ، وصفة أخرى سميت « غرابة strangeness » ؛ فالثمانية مثلاً تتألف من ثنائية نكليونية مشحونة (بروتون ، نترون) ، ومن الأحادية الحيادية Λ° (لمبدا) ، ومن الثلاثية المشحونة Σ^+ وΣ° وΣ^- (سِغْما) ، ومن الثنائية المشحونة Ξ^- وΞ° (إكسي) . وتتميز كل فئة من هذه الفئات الفرعية بقيمة عددية صحيحة من « الغرابة » وهي 0 ,—1 ,—1 و—2 لكل فئة فرعية على الترتيب نفسه . أما كتل العناصر في فئة فرعية فتكاد تكون متساوية ، ولكن وسطها يزداد من نحو 940MeV للثنائية النكليونية إلى 1321MeV وهي كتلة الثنائية إكسي . بيد أن فيزيائيي الجسيمات أدخلوا أيضاً تسمية عددية أخرى (عدد صحيح أو نصف عدد فردي) سميت « السبين النظيري » ، وهي تعطي عدد المركبات في كل فئة فرعية ولا علاقة لها بالسبين الحقيقي بل لها علاقة بالشحنة الكهربائية ، إذ عدد المركبات المختلفة المشحونة (حتى وإن كانت شحنتها منعدمة) في فئة فرعية يساوي ضعفي العدد السبيني النظيري مضافاً إليه 1 ، فالسبين النظيري مثلاً للفئة الأحادية هو 0 ، والسبين النظيري للثنائية هو $\frac{1}{2}$ ، والسبين النظيري للثلاثية هو 1 وهكذا دواليك .

وتتألف العشارية من فئات فرعية أولاها : $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^\circ, \Delta^-$ (رباعية دلْتا وسبينها النظيري

$\frac{3}{2}$ وغرابتها 0) ؛ والثانية $\Sigma^{-}, \Sigma^{\circ}, \Sigma^{+}$ (ثلاثية سِغْما وسبينها النظيري 1 وغرابتها —1) ؛ والثالثة Ξ° وΞ^{-} (ثنائية إكسي وسبينها النظيري $\frac{1}{2}$ وغرابتها —2) ؛ والرابعة Ω^{-} (مفردة أوميغا وسبينها النظيري 0 وغرابتها —3) . وتبين قصة اكتشاف هذه الفئات وكيفية تسميتها تبصراً هاماً في تفكير فيزيائيي الجسيمات في العقود الثلاثة الأخيرة . وقد كان أول تأكيد تجريبي على وجود باريونات أخرى (غير النكليونات) خارج نطاق الأشعة الكونية ، هو ما وجد في المسرعات العالية الطاقة التي أحدثت اصطداماً عنيفاً داخل غرفة الفقاعات بين البيونات (π^{-}) ، التي طاقتها الحركية مرتفعة جداً وذات شحنة سالبة وبين البروتونات المستقرة ، وقد أدى هذا الاصطدام إلى ظهور جسيمات شحنتها معدومة . ويدل انتهاء مسيرة البيون π^{-} المفاجيء على أن هناك بروتوناً أسره (بحسب ما يقتضي مبدأ انحفاظ الشحنة) ، ولكن انحفاظ الاندفاع (أي اندفاع البيون) يقتضي انبثاق جسيمين عديمي الشحنة يبتعدان عن نهاية مسيرة البيون ، ويكون لكلٍ منهما اندفاعه الملائم لأن يصبح مجموع الاندفاعين مساوياً اندفاع البيون الأسير ؛ ولكن لا يُرى أثر لهذين الجسيمين الجديدين في غرفة الفقاعات بسبب انعدام شحنتيهما ، غير أنه يظهر فيما بعد أثران جديدان استُدل منهما على أن أحدهما هو باريون (لمبدا صفر Λ° والآخر هو ميزون من نوع جديد K° ، وكانا قد تولدا معاً عند النقطة التي امتص فيها البروتون البيون ، ويعبَّر عن هذه العملية رمزياً على النحو الآتي : $P^{+} + \pi^{-} \rightarrow \Lambda^{\circ} + K^{\circ}$

ويتميز الجسيم Λ° ببعض الخواص المحيرة فعلاً فيما يتصل بالقوة (القوة الشديدة) التي ولَّدته ، فقد تولد بسرعة كبيرة ــ بجزءٍ من تريليون تريليون من الثانية (وبغزارة كبيرة) ــ أي مثلما يمكن للمرء أن يتوقع من تأثير القوة الشديدة ، ولكن مدة حياته أطول بكثير جداً من مدة تولده (فهي جزء من عشرة مليارات من الثانية) يتفكك بعدها إلى بروتون وπ^{-} أو إلى نترون وπ° ، وهذا ما دعا فيزيائيي الجسيمات إلى تسميته جسيماً « غريباً » وعللوا تفككه البطيء نسبياً (طول مدة حياته) بقولهم إن له نوعاً من « الشحنة » التي سموها « الغرابة » وأنها تُحفظ عند التفاعلات الشديدة ، فهو لذلك لا يمكن أن يتفكك عن طريق التفاعلات الشديدة ــ وهو تفكك سريع جداً ــ بل لا بد أنه يتفكك عن طريق التفاعل الضعيف مع عدم انحفاظ الغرابة ، أي أن التفاعلات الشديدة تحفظ الغرابة في حين لا تحفظها الضعيفة .

ولكن إذا كانت الغرابة محفوظة في التفاعلات القوية فكيف يمكن أن نعلل إذاً ظهور الجسيم Λ° بأنه نتاج قوة شديدة من جنسيمين غرابتهما معدومة ؟ لقد فُسّر هذا الأمر بفكرة أن الجسيمات الغريبة تتكون في صورة أزواج تسمى « نتاج مصاحب » associated production ، وأحد عنصري الزوج هو Λ° و « غرابته » سالبة 1— ، أما الآخر فهو K° و « غرابته » موجبة + 1 . وهكذا تكون الغرابة منحفظة في عملية توليدهما ، ولذلك يمكن تشبيه توليد Λ° وK° بتوليد الزوج إلكترون ــ بوزترون ؛

فالبوزترون مثلاً هو في وضع لا يمكّنه من العيش من دون أن يلاقي إلكتروناً (أي بوزتروناً مضاداً) ويتفانى الاثنان معاً، ولذلك يحتاج البوزترون إلى وقت لكي يتفانى ويختفي أطول مما يحتاجه لكي يتولد؛ والجسيم $\Lambda°$ كذلك لا يمكنه أن يتفكك بسرعة (تفكك بقوة شديدة) مع الاحتفاظ بغرابته إلا إذا تفكك هو وجسيم آخر $K°$، وإذا لم يحصل ذلك، يمكنه أن يتفكك عندئذ بقوة ضعيفة فقط مع غرابة غير منحفظة. وقد أُدخلت كل هذه المفاهيم (النتاج المصاحب، الغرابة وانحفاظها وعدمه) لكي تفسر طول حياة $\Lambda°$ وكل الجسيمات الغريبة الأخرى التي تولدت في المسرعات العالية الطاقة التي أُنشئت وشُغِّلت في ستينيات وسبعينيات وثمانينيات هذا القرن.

وكانت المسألة التي نشأت مع وفرة هذه الباريونات الثقيلة كلها، هي هل يمكن أن يؤدي ترتيبها في «عدودات فائقة» وفئات فرعية في هذه العدودات إلى فهم هذا الترتيب بدلالة جسيمات أكثر أساسية (أو أولوية) مثلما أمكن بالطريقة نفسها تفهم بنى نوى الذرات ونظائرها بدلالة النترونات والبروتونات؛ والحقيقة أن روبرت هفستدْتر Robert Hofstadter، ومعاونوه كانوا قد أثبتوا سابقاً أن الباريونات ليست جسيمات أولية وإنما هي مؤلفة من جسيمات أكثر أولوية من النترونات والبروتونات (أي النكليونات)، إذ سبَر هُفْستدتر بنية البروتونات باستخدام إلكترونات نشيطة جداً (عالية السرعة وهي في الأساس إلكترونات مجهر إلكتروني قوي جداً)، واستنتج من مسارات الإلكترونات المتبعثرة عن البروتونات أن البروتون ليس نقطة مشحونة بلا بنية داخلية فيه بل إنه يتصرف مثل شحنة موزعة على حيّز منته له بنية معقدة. وقد أظهرت تجارب متعاقبة استُخدمت فيها إلكترونات عالية الطاقة جداً، (أو عمليات سبر عميقة جداً)، أن شحنة النكليون ليست موزعة توزعاً منتظماً في حجم النكليون وإنما هي مركزة في عقد منفصلة. كذلك دل المزيدُ من التجارب بعد ذلك على أن كل باريون من الباريونات التي تؤلف فئة الثمانية وفئة العشارية من العدودات الفائقة ثلاث شحنات مختلفة تماماً، وقُبل عندئذ أن هذه الشحنات هي الجسيمات الأساسية التي تتألف منها كل المادة.

ولد روبرت هُفْستدتّر في مدينة نيويورك عام 1915 وهو ابن لويس هفستدتر والمدعوة سابقاً هنريتا كونيغسبرغ H.Koenigsberg، وقد غرس الأبوان في ابنهما، مثل الكثير من آباء الفيزيائيين البارزين، حباً للثقافة والتعليم لا يقتصر على فرع من المعرفة معين[1]. وتلقى روبرت تعليمه الابتدائي والثانوي في مدارس نيويورك العامة، وليس عجيباً أو مدهشاً أنه نال في دروسه درجات عالية. أما تعليمه العالي قبل التخرج فكان في كلية مدينة نيويورك حيث برَّز في الرياضيات والفيزياء، وتخرج بدرجة امتياز في عام 1935 ونال في العام نفسه منحة من شركة جنرال إلكتريك مكّنته من الدراسة في جامعة برنستون حيث حصل على درجتيْ الماجستير ودكتوراه الفلسفة في عام 1938[1]. وكانت رسالته في الدكتوراه تعالج طيف الجزيئات العضوية تحت الأحمر، ولكنه أصبح بعد الدكتوراه مهتماً

باستخدام البلورات لكشف الإلكترونات، وهي طريقة تبين أنها ذات فائدة كبيرة جداً لأعماله فيما بعد في تجارب الإلكترونات المتبعثرة العالية الطاقة[1]. وفي عام 1939 ترك هفستدتر برنستون لينتقل إلى ولاية بنسلفانيا حيث أصبح مهتماً بالفيزياء النووية ولا سيما بنية البروتون والنترون.

وبعد أن دخلت الولايات المتحدة الحرب العالمية الثانية في إثر الهجوم على بيرل هاربر، اضطر كثير من الفيزيائيين بما فيهم هفستدتر إلى أن يضعوا مشاريع بحوثهم الشخصية في دعم المجهود الحربي ومساندته بمواهبهم، وقد عمل هفستدتر عندئذ في مكتب المعايير وبعدئذ في شركة نورْدِن حيث ظل حتى نهاية الحرب[2] حين عاد إلى برنستون ليكون مساعد أستاذ، فطوّر عداداً مصنوعاً من بلورات يود الصوديوم الممزوجة بالتاليوم[2]، ثم سرعان ما وجد أن هذه البلورات هي آلات قياس رائعة لأشعة غاما والجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات[2].

وفي عام 1950 التحق هفستدتر بكلية ستانفورد ليعمل أستاذاً مساعداً. ولما كان المسرع الخطي العالي الطاقة قد بني بالقرب من الحرم الجامعي عندما وصل هفستدتر فقد استخدم هناك مهاراته التجريبية التي طورها في برنستون ليساعد في تصميم وإشادة تجهيزات استطاع أن يستخدمها في تجارب التبعثر في ستانفورد[2]، وما أن أصبح المسرّع شغالاً حتى خصص هفستدتر أعماله كلها لفيزياء الجسيمات العالية الطاقة ثم أجرى في الخمسينيات سلسلة من التجارب تتوجت في قياساته لتوزع الشحنة والعزوم المغنطيسية في النكليونات[2]، وبصورة أدق «عيَّن عواملها الشكلية الكهرطيسية الأربعة» التي كل منها «كمية تقنية تصف كيف يتفاعل الجسيم مع الجسيمات الأخرى ومع الحقول» بحيث أن «سلوكها أصبح طريقة عامة لوصف حجم النكليون وشكله أكثر مما يمكن أن يتم باستخدام نموذج»[3]. وفي عام 1961 نال هفستدتر جائزة نوبل في الفيزياء لعمله في مجال النكليونات ولا سيما اكتشافه «أن البروتون والنترون مؤلفان من قلب مركزي مكوّن من مادة ذات شحنة موجبة يحيط به غلافان من مادة ميزونية»[4]. وقد أثبت هذا الاكتشاف أن البروتون والنترون هما جسيمان معقدان جداً وليسا كنقطتين أو أوليين كما افتُرض من قبل[5].

ولا يزال فيزيائيو الجسيمات يهتدون بتقنيات هفستدتر التجريبية، إذ ظل استخدام الجسيمات المشحونة العالية الطاقة (أي الإلكترونات) أحد أكثر الطرائق استعمالاً في سبر البروتونات والنترونات الفردية في النواة. وكلما كان الجسيم المشحون أعلى طاقة أمكنه أن ينفذ في النواة إلى مدى أعمق قبل أن يغير اتجاهه، فهناك إذاً علاقة طردية بين طاقة الجسيمات المشحونة ومدى الدقة التي يمكن أن توصف بها تجارب تبعثر الإلكترونات. وقد استنتج هفستدتر نفسه أنه يمكن أن توجد «ميزونات أكبر كتلة من تلك المعروفة سابقاً وأن هذه الميزونات تتضمن ما دعاه الميزونات ـــ رو rho والميزونات ـــ أوميغا»[6] التي تقوم بأدوار مهمة في التفاعل بين النكليونات[7]، كما قاس هفستدتر أبعاد العديد من النوى واكتشف كيف تنظم المادة النووية نفسها في أكثر أوضاعها



روبرت هفستدتر (1915-   )

استقراراً ووجد أيضاً أن « النوى تكوّن حول نفسها منطقة سطحية ذات ثخانة ثابتة تنقص الكثافة فيها تدريجياً حتى الصفر ، أما في مراكز النوى فتكون الكثافة النووية شبه ثابتة » .

ولقد كانت تجارب هفستدتر بداية الطريق إلى التطور النظري الواسع الذي حدث في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة والذي يدعى الآن « نظرية الكواركات (q) » أو النموذج الكواركي للهدرونات (الباريونات والميزونات) . وقد بدأ هذا التوسع مع مرّي غيلمان Murray Gell-Mann الذي أثبت من اعتبارات تناظرية عامة جداً أن ترتيب الباريونات في « عدودات فائقة » من ثمان (ثمانية) ومن عشرة (عشارية) يمكن أن يفهم بدلالة ما دعاه « ثلاثية كواركات »* أي يتطلب الأمر ثلاثة أنواع مختلفة من الكواركات لكي تُفسر الفئات الفرعية (الثمانية والعشارية) في كل عدودة فائقة .

ثم إن للجدول الزمني للأحداث التي أدت إلى إدخال « الغرابة » ومفهوم « النتاج المصاحب » أهميته . ففي عام 1952 بدأ الفيزيائيون في مختبر بروكهافن Brookhaven الوطني بتشغيل المسرع

* كوارك اسم غريب لا معنى له اقتبسه غيلمان كما سيتبين فيما بعد .

كوسموترون (مسرع البروتونات) الذي كان يولد اصطدامات طاقتها مليار إلكترون فلط بين الجسيمات المتصادمة فتولدت كما كان متوقعاً جسيمات جديدة تتدرج كتلها بين 500MeV و1700MeV ، وقد سميت فئة هذه الجسيمات فئة الهيبيرونات Hyperons التي سرعان ما جُزِّئت إلى فئات فرعية مؤلفة من الميزونات الثقيلة (هي الميزونات K أو كاؤونات) التي سبينها 0 وكتلها نحو 500MeV ، هي مثل البيونات تتفاعل بشدة مع النكليونات ، وهناك أيضاً فئة فرعية من ستة باريونات « ثقيلة » (سبق لنا تسميتها ووصفها) وتراوح كتلها بين 1100MeV و1400MeV ، وهنا نتساءل : تُرى كيف تتوزع هذه الباريونات الستة على فئات فرعية أصغر من السابقة ؟ إن لهذه الباريونات ، كما سبق أن رأينا ، العدد الباريوني نفسه +1 والسبين نفسه $\frac{1}{2}$ ، والمماثلة + أو- وشحنتها الكهربائية -1 ,0 ,+1 ، ولكن السبين والعدد الباريوني والمماثلة والشحنة لا تفسر وحدها الفئات الفرعية الأربع المختلفة الكتل التي يتجزأ إليها بصورة طبيعية النكليونات والباريونات « الثقيلة » الستة ؛ وهكذا تطلب الأمر كمية فيزيائية أخرى (هي عدد كمومي) لكي تُميز هذه الفئات الأربع المختلفة الكتل بميزة وحيدة . وقد فطن إلى هذه الكمية ، وهي « الغرابة » ، اثنان من العلماء في وقت واحد تقريباً في عام 1955 (ولكن بصورة مستقلة) وهما : الفيزيائي الياباني ك . نيشيجيما K.Nishigima الذي تصورها نوعاً من الشحنة و م . غيلمان . ويتحكم بهذه الغرابة مبدأ انحفاظ كانت قد اقتضته ملاحظة أ . بيز A.Pais في عام 1954 ، وهي تقول إن الهيبيرونات الغريبة تتولد دائماً في أزواج ، ويشارك كل فرد من الزوجين في خاصة مشتركة (الغرابة) لكي تصبح قيمتها الكلية مساوية للصفر . وقد دعي تولد الأزواج هذا فيما بعد « النتاج المصاحب » . ثم عندما أُدخلت الكواركات عام 1964 أُدخل كوارك غريب لكي يحمل شحنة الغرابة ، وليكمل عدد الكواركات في الفئة الفرعية « الثمانية » إلى ثلاثة كما سوف يوصف أدناه بالتفصيل .

كان مُري غيلمان ابناً لمهاجر نمساوي ، وقد ولد في مدينة نيويورك في عام 1929 وأظهر مثل الكثير من العلماء الآخرين براعة في الرياضيات والفيزياء منذ صغره ، واستطاع الانتساب إلى جامعه ييل للقيام بدراسته الجامعية منذ أن كان في الخامسة عشرة وبعد أن نال البكالوريوس في عام 1948 غادر نيوهافن إلى كمبردج في ماساشوستس وانتسب بصفة طالب مجاز إلى معهد ماساشوستس للتكنولوجيا (MIT) حيث منح دكتوراه فلسفة بعد ثلاث سنوات من دراسته . وفي عام 1952 ترك غيلمان هذا المعهد ليدرس تحت إشراف إنريكو فرمي في جامعة شيكاغو حيث ظل حتى عام 1955 ، أي السنة التي تلت موت فرمي . وكان قبول غيلمان في زمرة أبحاث فرمي دليلاً يبشر بنبوغه في المستقبل كفيزيائي نظري ، ولكن الأغرب من ذلك هو صعود نجمه بعد التحاقه بالكلية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجية في باسادينا في عام 1956 ، إذ رقي في أقل من سنة إلى منصب أستاذ اعترافاً بعمله الهام الذي كان قد بدأه في فيزياء الجسيمات « ففي عام 1953 افترض غيلمان أن هناك

بعض الجسيمات تحت الذرية التي تملك صفة ثابتة سماها « غرابة » تظل منحفظة في التفاعلات الشديدة والكهرطيسية ، ولكنها ليست منحفظة في التفاعلات الضعيفة »[8] .

وقد أحدث اقتراح غيلمان هذا ، وهو من أولى بوادر التصورات التناظرية ، بعض الترابط بين الجسيمات المتكاثرة المضطربة في الأربعينيات والخمسينيات وساعد في شرح « عدد من الميزات في سلوك الجسيمات الغريبة المتولدة اصطناعياً الثقيلة القصيرة الأجل »[9] . وكان هذا الاقتراح بشيراً بما قدمه غيلمان بعد ذلك وفيزيائيون آخرون من تصورات لتفسير سلوك الجسيمات المتفاعلة. « وفي عام 1961 أعلن غيلمان وكذلك الفيزيائي الاسرائيلي نيمان Ne'eman نظاماً جديداً لتصنيف الجسيمات التي تتفاعل بشدة تصنيفاً موحداً والتي دعاها غيلمان « طريقة الثمانية » ففي هذا التصور يعبر عن الجسيمات الغريبة المختلفة وغيرها بأنها « تكرارات » لبعض حالات أساسية »[10] .

وسرعان ما أثبتت طريقة غيلمان (طريقة الثمانية) فائدتها عندما اكتشف الفيزيائيون التجريبيون الجسيم Ω^- (الذي سبق التنبؤ به) في عام 1964 . أما السمة غير المألوفة في خطة تصنيف غيلمان فكانت ادعاؤه بأن هناك جسيمات نقطية لها شحنات كسرية كان قد دعاها « كواركات » استقاها من كلمة في مقطع مسجوع معناه « ثلاثة كواركات لأجل مستر مارك » في قصته « فنغنز ويك Finnegans Wake » لمؤلفها جيمس جويس James Joyce . وقد اقترح غيلمان أن هناك ثلاثة كواركات في الطبيعة دعاها علوي u (up) ، وسفلي d (down) وغريب s (strange) ، كما اقترح أن شحنة كل منها هي إما $\frac{1}{3}$ أو ـ $\frac{2}{3}$ من شحنة الإلكترون . ومع أن هذه القيم كانت اختيارية ، فقد قبلت بأنها هي وحدة الشحنة الكهربائية . وهكذا ساد الاعتقاد بأن مادة الكون كلها تتألف من كواركات ولبتونات (أي كالإلكترون والنترينو) لأن الأولى مثل الثانية ليس لها بنية داخلية معروفة ، وهذا ما دعا عدداً من الفيزيائيين إلى محاولة إثبات أن البحث عن لبنات بناء الطبيعة سوف يُختتم بالاكتشاف المتوقع للكوارك t الذروي (top أو truth) .

وقد سلم الفيزيائيون بمخطط غيلمان على الرغم من أنهم لما يكتشفوا بعد عملياً كواركاته بل إن بعضهم توسع وزينها بأسماء عجيبة مثل جميل b (beauty) ومفتون c (charm) و ذروي t (top) ، فأقلقت كثرة الكواركات هذه عدداً من الفيزيائيين من أن فيزياء الجسيمات ربما تكون عائدة إلى ما اكتنفها من التشويش في أربعينيات هذا القرن ، إلا أن طريقة غيلمان الأصلية (طريقة الثمانية) ظلت على عهدها حجر الزاوية في فيزياء الجسيمات . وقد انتخب غيلمان في أكاديمية العلوم الوطنية عام 1960 بفضل عمله في تنظيم أسر الجسيمات ، كما نال أيضاً جائزة نوبل للفيزياء عام 1969 .

لقد فرض غيلمان مبدئياً (وبصورة مستقلة ج . زفيغ G. Zweig) نوعين من الكواركات (أو نكهتيْن كما سميا) وهما « علوي » أو كوارك (u) وشحنته $\frac{2}{3}$ e (e هو القيمة العددية

لشحنة الإلكترون) ، و« سفلي » أو كوارك (d) وشحنته - $\frac{e}{3}$ وهكذا صُوِّر البروتون بأنه البنية المركبة udu (أي 2 كوارك علوي و1 كوارك سفلي) ، وصوِّر النترون بأنه البنية dud (2 سفلي و1 علوي) . ولم يكن الفيزيائيون في بادئ الأمر راضين عن فرضية الكواركات وما عزته للكواركين u وd من شحنات جزئية من شحنة الإلكترون لأنهم كانوا قد نشؤوا على فكرة أن أصغر شحنة في الطبيعة (أو وحدة الشحنة) هي الشحنة e للإلكترون وأن جميع الشحنات يجب أن تكون مضاعفات تامة موجبة أو سالبة من هذه الشحنة الأساسية . ولكن هذه الفكرة لا يمكن الأخذ بها (كما هو واضح) إذا كانت الباريونات تتألف من ثلاثة كواركات مشحونة ، وبذلك فقدت فكرة وحدة الشحنة الفعلية معناها لأنه لم تعد تسمية شحنة الإلكترون وحدةَ الشحنة أصلح كثيراً من تسمية شحنة الكوارك u أو الكوارك d وحدة الشحنة .

ولا شك أن ما يمسك الكواركات الثلاث في النكليون أو الباريون في نظرية الكواركات هو القوة الشديدة ، ولكن هذه القوة لا يُعرف شيء عن صيغتها الرياضية ، لذلك لا يمكن لهذه النظرية أن تعطي صورة ديناميكية عن الكواركات داخل الباريون. كذلك فإن كتل الكواركات المكوّنة ليست معروفة فيما عدا أنه قُدر أن كتلة الكوارك d أكبر من كتلة الكوارك u ، وهذا الأمر محيِّر لأن شحنة الكوارك d الكهربائية أصغر من شحنة الكوارك u ، في حين كان يُتوقع أن تكون الكتلةُ الكبرى للشحنة الكبرى ، لأن الشحنة نفسها تساهم في الكتلة .

ثم عندما اكتشف الباريون Λ° والباريونات « الغريبة » الأثقل منه في الثمانية اتضح فوراً أن الكواركيْن u وd لم يعودا كافيين لتفسير بنية الباريونات الغريبة ، مما اقتضى وجود كوارك ثالث ، فافترض وجود الكوارك s (لأجل الغرابة) وشحنته ـــ $\frac{e}{3}$ ، وكتلته أكبر من كتلة الكوارك d ؛ ويعني وجود كوارك واحد s في باريونٍ ما أن « غرابته » ـــ1 ، ووجود كواركيْن s فيه أن غرابته ـــ2 ؛ وهكذا فإن التكوينة الكواركية للباريون Λ° هي dus وتكوينة Σ^{-} هي dsd ، أي أن غرابة كل منهما هي ـــ1 ، في حين أن غرابة إكسي السالب Ξ^{-} الذي تكوينته sds هي ـــ2 ، وغرابة Ω^{-} (في العشارية) الذي تكوينته sss هي ـــ3 .

إن لكل كوارك (q) ، مثل الجسيمات الأخرى المعروفة ، مضاده $\bar{q}$ الذي شحنته الكهربائية مخالفة بالإشارة لشحنة الكوارك ، وكذلك غرابته مخالفة لإشارة غرابة الكوارك . وهكذا فإن التكوينة $\bar{u}\,\bar{d}\,\bar{u}$ هي بروتون مضاد $\bar{P}$ ، والتكوينة $\bar{d}\,\bar{u}\,\bar{d}$ هي نترون مضاد $\bar{n}$. وتتألف جميع الميزونات من كوارك ومن كوارك مضاد ، وهكذا فإن الميزونات π^{-} وπ° وπ^{+} هي التراكيب $(\bar{u}\,d)$ ، $(\bar{u}\,u$ أو $\bar{d}\,d)$ و$(\bar{d}\,u)$ على الترتيب ، ولذلك فإن π° مضاد نفسه وπ^{-} هو مضاد π^{+} والعكس بالعكس . أما تعليل طبيعة الباريونات الفرميونية (أي سبينها $\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$) فقد أُرجع إلى أن جميع الكواركات لا بد أن يكون سبين كلٍ منها $\frac{1}{2}$ (أي أن

الكواركات هي نفسها فرميونات وهذا يعني أن الميزونات هي بوزونات سبينها 0 أو 1 .

لقد لاقت نظرية الكواركات بوضعها البسيط الذي وصف أعلاه بعض الصعوبات التي اقتضاها إدخال صفات كواركية إضافية زادت في تعقيد النظرية زيادة هائلة . فالنظرية بوضعها البسيط تتعارض مع مبدأ باولي في الانتفاء الذي ينص على أنه لا يمكن لفرميونين متطابقين أن يوجدا في حالة كمومية واحدة ، إذ النموذج الكواركي البسيط يعامل جميع الكواركات u على أنها فرميونات متطابقة وكذلك جميع الكواركات d والكواركات s ، فهذه المقاربة تعني أن الباريونات التي تتألف من ثلاثة كواركات u في حالة واحدة ، أو من ثلاثة كواركات d في حالة واحدة ، لا يمكن أن توجد ؛ ولكن العشارية تتضمن الباريون (Δ^{++}) المؤلف من uuu ، وكذلك الباريون (Δ^{-}) المؤلف من ddd . فالتعارض بين هذين الباريونين ومبدأ باولي في الانتفاء بارزة جداً ، لأن الكواركات الثلاثة المعروفة في النظرية الكواركية كما طورها غيلمان وآخرون موجودة في الباريون في الحالة الفضائية الأساسية نفسها ، ولكن إذا كانت الكواركات الثلاثة متطابقة ، كما في حالة Δ^{++} وΔ^{-} ، فإن اثنين منها على الأقل لا بد أن يكونا أيضاً في حالة سبينية واحدة ، فسبينات هذه الكواركات يجب أن يكون كل منها موازياً للآخر أو معاكساً له ، لذلك لا يمكن أن يكون بينها سوى اثنين متعاكسين وهما بالتالي في حالة فضائية أساسية واحدة مسموح بها . وهكذا يكون سبين الكوارك الثالث المطابق لهما موازياً لأحدهما حتماً : لذلك يتعارض وجود ثلاثة كواركات معاً في حالة فضائية أساسية واحدة مع مبدأ باولي في الانتفاء ، فهو بالتالي فرض غير مقبول . وهنا أزال غيلمان ومعاونوه هذا التعارض أو أبطلوه بأن اقترحوا فرضية تقول إن كل كوارك من الكواركات الثلاثة s, d, u يكون في ثلاث نوعيات سُمِّيت — رغبة في تسمية أفضل — ألواناً ، وهي « الأحمر » و« الأصفر » و« الأزرق » ، وهكذا أزيل التعارض مع مبدأ باولي في الانتفاء بتصور أن الباريون Δ^{++} لا يتألف من ثلاثة كواركات u متطابقة بل من كواركات u ألوانها « الأحمر » و« الأصفر » و« الأزرق » وبذلك يكون الباريون Δ^{++} نفسه « عديم اللون » .

وتوصف القوة الشديدة بين الكواركات على غرار القوة الكهرطيسية بين الشحنات الكهربائية ، فكما تنتقل هذه القوة بإصدار فوتونات وامتصاصها ، كذلك تنتقل القوة الشديدة بوساطة بوزونات تشبه الفوتونات (كتلتها السكونية صفر) وسبينها 1 وتدعى « غليونات » ، وهي نفسها ملونة أيضاً ، لذلك فإنها تتفاعل فيما بينها . وهكذا تختلف التاوونات اختلافاً كبيراً عن الفوتونات لأنها تحمل الشحنة الملونة (التي هي مصدر القوة الشديدة) ، في حين أن الفوتونات التي تحمل القوة الكهرطيسية لا تحمل شحنات كهربائية (أي مصدر القوة الكهرطيسية الشديدة) ، لذلك لا تتفاعل الفوتونات فيما بينها . ولكن تصور القوة الشديدة على هذا النحو يعني أن الغليونات يمكن أن تبدل « ألوان » الكواركات عندما تطلقها أو تمتصها ، وهي تقوم بذلك لأنها تحمل في آن واحد أحد الألوان الثلاثة : r (الأحمر) وy (الأصفر) وb (الأزرق) وأحد الألوان المضادة

$\bar{r}$ أو $\bar{y}$ أو $\bar{b}$ ، لذلك ، إذا حمل أحد الغليونات اللون r واللون المضاد $\bar{b}$ (المشار إليه بـ $G_{r\bar{b}}$) ثم امتصه كوارك « أزرق » ، فإن لون هذا الكوارك سيتبدل إلى « الأحمر » ، ويتبدل لون الكوارك الذي أطلق هذا الغليون من « الأحمر » إلى « الأزرق » ، أما الغليون الذي يحمل اللون ومضاده فلا يبدل لون الباريون . فبموجب نموذج الغليونات الحاملة للقوة الشديدة يوجد ستة غليونات تبدل اللون واثنان يحافظان على اللون فالموجود منها (كلها ثمانية)□ .

غير أن الكروموديناميك الكمومي في الحالة التي هو فيها الآن مُثقل « بالعديد من الفروض التي لا مبرر لها ، والتي ليس لها ما يؤكدها بالرصد . كما يفترض معظم فيزيائيي الجسيمات أن للقوة الشديدة خاصة تميزها وهي أن شدتها تزداد كلما ازدادت المسافة بين الكواركات ، ثم سرعان ما تصبح لا نهائية ؛ كما أنها تتناقص بسرعة نحو الصفر كلما اقتربت الكواركات أحدها من الآخر . ويدعى تزايد قوة « اللون » السريعُ مع تزايد الفاصل بين الكواركين « المتاخمة الكواركية للانهاية » ؛ فبحسب هذا المفهوم لا يمكن أن يوجد كوارك حر ، ومن ثم لا يمكن مشاهدة « اللون » أبداً . وهذا يعني أن الكواركات يجب أن تظهر دائماً في اتحادات « لا لونية » (أي إما على صورة ثلاثية هي الألوان byr أي باريونات ، أو على صورة ثنائية « لون ولون مضاد » أي ميزونات) . والحقيقة أن هذا الافتراض القائل بمتاخمة اللانهاية لا يقوم على أي دليل ملموس بل هو مجرد استقراء نظري انبثق من أن الكواركات الحرة لم يسبق أن شوهدت أبداً في الأشعة الكونية أو حتى في المسرعات العالية الطاقة . ولكن هذا لا يعني أن الكواركات متجاورة كلياً وإنما يعني أن الطاقات التي تربطها معاً في باريونات وميزونات هي طاقات هائلة ــ أي من رتبة عشرة ملايين تريليون جيغا إلكترون فلط أي كما هو الحال فيما لو كانت كتلة الكوارك الحر هي كتلة بلانك (أي جزء من مئة ألف من الغرام بحسب ما فرض أحد الباحثين (وهو موتز Motz) .

□ لقد دعيت نظرية غليونات ــ الكواركات الملونة الخاصة بالقوة الشديدة (التحريك اللوني) الكروموديناميك الكمومي (QCD) ، أي على غرار نظرية فوتونات القوة الكهرطيسية التي دعيت الإلكتروديناميك الكمومي (QED) ؛ ولكن على الرغم من كل الجهود التي بذلت لتطوير هذا الديناميك الجديد نظرياً فإن ما أنجز من قيم عددية في هذا السبيل كان قليلاً جداً إذ لم تتنبأ النظرية إلا بخواص عامة للباريونات والميزونات ، وهذا التنبؤ كان من الممكن القيام به بسهولة اعتماداً على نظرية أبسط وعلى مرتكزات نظرية أقل بكثير مما تعبق به الآن نظرية QCD . فمثلاً ، إذا كانت الكواركات هي جزيئات كبيرة الكتلة جداً (كتلتها 10^{-5} غرام ــ أي كتلة بلانك وتفقد معظم كتلتها عندما تتحد ثقالياً في ثلاثية على صورة باريون ، فإن الباريون يكُون دواراً خطياً له كوارك واحد في كل طرف والثالث في المركز ، وعندئذ يُبطل هذا النموذج الحاجة إلى الكواركات الملونة ، لأن الكواركات الثلاثة لا تكون عندئذ في الحالة الأساسية نفسها ، وتصبح القوة الشديدة مجرد ثقالة ؛ ويعطي هذا النموذج أيضاً تفسيراً صحيحاً لعزوم الباريونات المغنطيسية في الثمانية ، وهذا ما لا يستطيعه الكروموديناميك الكمومي . وأعظم جانب غير مُرضٍ في هذا النموذج هو كثرة الوسائط الاختيارية التي تثقل كاهله والتي يجب حشرها حسب الحاجة . وهكذا سيظل بناء نماذج منافسة للكروموديناميك الكمومي جزءاً مهماً من فيزياء اليوم ، طالما أن هذا الديناميك لم يقدم نموذجاً مرضياً للباريون .

كما أن الفرض القائل إن الكواركات الثلاثة داخل الباريون تتجول بحرية، لأن القوة «اللونية» تتلاشى عندما تصبح الكواركات متقاربة جداً فيما بينها (وهي ظاهرة تدعى «الحرية التقاربية»)، هو تأويل لا مبرر له في تجارب التبعثر. ففي هذه التجارب أُطلقت اللبتونات (أي الإلكترونات أو الميونات) العالية الطاقة نحو النكليونات، ثم دُرس سلوكها (أي مساراتها) عند مغادرتها لها بكل عناية وذلك للحصول على أي معلومة عن الحالة التحريكية (الديناميكية) للكواركات داخل الباريونات، فكانت النتيجة المستقاة من هذه المسارات هي أن الكواركات بدت كأنها تتحرك من دون أي رابط بينها، أي كأنها حرة؛ ولكن مسبراً لبتونياً لبنيةٍ كواركية كان سيتصرف بالطريقة نفسها بعد أن يتبعثر عن البنية المركبة فيما إذا كانت الكواركات مرتبطة بقوى الثقالة.

وقد ازداد عدد الكواركات المقبول حالياً إلى ضعفي ما كان عليه بعدما أُدخل الكوارك s، ففي عام 1970 أدخلت زمرة من الفيزيائيين النظريين من جامعة هارفارد كواركاً رابعاً سموه «مفتون Charm» (c) (بألوانه الثلاثة وشحنته $\frac{2}{3}$ e)، وذلك لتفسير نوع من التفاعلات الهدرونية التي لا تحدث إلا نادراً بالمقارنة مع وفرتها المتوقعة، ثم اكتشف فريق من التجريبيين في مختبر بروكهافن الوطني في عام 1974 ميزوناً سموه j، كما اكتشف فريق آخر يعمل على مسرع ستانفورد الخطي ميزوناً سموه بْسي psi، ثم تبين فيما بعد أن هذين الجسيمين هما ميزون واحد مكون من كوارك أثقل من الكوارك s ومن كوارك مضاد؛ وقد عُدَّ وجود هذا الميزون (j أو بسي) دليلاً على اكتشاف الكوارك «مفتون» لأن كتلته (3,7 GeV) أكبر من أن يُعد تركيباً من الكوارك s مع مضاد الكوارك u أو مضاد d.

وفي عام 1977، أي بعد اكتشاف الكوارك مفتون (c) اكتشف فريق من الفيزيائيين في مختبر فرمي بقيادة ل. ليدرْمان ميزوناً جديداً كتلته 9,46 GeV، وشحنته $\frac{e}{3}$، فقبلوا بأن هذا الميزون دليل على وجود كوارك خامس سموه b (من bottom قعري)، ولكن هذا الاكتشاف لم يوقف البحث عن الكواركات، لأن فيزيائيي الجسيمات احتجوا بأن التناظر بين اللبتونات والكواركات يتطلب وجود كوارك سادس؛ ويمضي جدل التناظر إلى حدٍ ما على النحو التالي: توجد ثلاثة «أجيال» (أو أسر كما تدعى) من اللبتونات (ν_e, e)، (ν_μ, μ)، (ν_τ, τ)،أي ثلاثة جسيمات شبيهة بالإلكترون، هي الإلكترون والميون والتاو، وثلاثة نترينوهات ν_τ, ν_μ, ν_e، أي نوع مختلف لكل نوع من الإلكترون؛ لذلك يجب أن يوجد ثلاثة أجيال أو أسر من الكواركات (u, d), (c, s), (t, b) حيث t (من top أي ذروي) هو الكوارك الذي لما يكتشف بعد؛ وهذه حجة ضعيفة جداً وغير جديرة بالثقة ذلك لأن نموذج النترينو τ لم يلاحظ من قبل قط، كما أن الدليل الحسي على وجود الكوارك «ذروي» ضعيف إلى أبعد الحدود؛ ولكن حتى لو اكتشف ميزون ثقيل جداً فإن المحاكمة التي أوجزناها أعلاه تظل باطلة، لأن اللبتون والكوارك هما نوعان من الجسيمات مختلفان اختلافاً أساسياً،

وهذا ما يؤكده إلى حد بعيد أن كتلة النترينو السكونية تساوي الصفر.

والآن دعونا نختتم هذا الفصل عن الجسيمات العالية الطاقة بدراسة موجزة للبوزونات الوسيطة $W\pm$ و Z° التي افترض أنها حوامل أو وسائل نقل التأثيرات المتبادلة الضعيفة، أي القوة التي تسبب تفاعل النترينوهات والباريونات والميزونات؛ فهذا التفاعل لا يظهر إلا عندما يكون النترينو قريباً جداً من الباريون أو الميزون لأن مداه هو 10^{-15} سم، لذلك يجب أن تكون كتل البوزونات الوسيطة (التي تحمله) كبيرة جداً. وقد دلت بعض الاعتبارات النظرية المنبثقة عن محاولة توحيد التفاعلات الكهرطيسية والضعيفة (فيما يدعى النظرية الكهرضعيفة) على أن كتلة $W\pm$ هي نحو 80GeV، وكتلة Z° هي نحو 92GeV، وتأتي حاجتنا إلى بوزونين وسيطين W^{+} و W^{-} من أن النترينو يمكن أن يتفاعل مع الباريونات والميزونات بتغيير شحناتها الكهربائية، وهكذا فإن النترينو يمكن أن يغير النترون إلى بروتون (يزيد شحنته +1) مع إطلاق إلكترون ونترينو مضاد؛ وتتولد سيرورة التفكك بيتا هذه بأن يطلق النترونُ البوزونَ W^{-} من كواركه d (ويصبح الكوارك d كواركاً u) وعندئذ يتفكك W^{-} بسرعة إلى إلكترون ونترينو مضاد؛ وإذا تفاعل نترينو ميوني (أي ν_{μ}) مع نترون، الأمر الذي يحدث (بحسب النظرية) حين يطلق هذا النترينو بوزوناً W^{+} يمتصه النترون، عندئذ يتحول هذا الأخير (أي النترون) إلى ميون سالب (μ^{-})؛ أما البوزون Z° فيتم تبادله بحسب نظرية البوزونات الوسيطة بين البروتون والنترينو العالي الطاقة عندما يبعثر البروتون هذا النترون من دون أن يكتسب شحنة ومن دون أن تتغير شحنة البروتون الكهربائية. ولنلاحظ أن W^{+} و Z° هما بوزونان متجهيان لأن سبينهما يساوي 1 (أي $\hbar$).

وفي عام 1981 شغّل الفيزيائيون التجريبيون في CERN بإدارة ك. روبيا **C.Rubbia** السنكروترون الفائق المصادم للبروتونات الذي تصطدم فيه حزمة البروتونات الجارية في اتجاه معين مع حزمة البروتونات المضادة الجارية في الاتجاه المعاكس، وقد صُمم هذا المصادم لتنطلق طاقة كلية قدرها 540GeV عندما يتصادم بروتون وبروتون مضاد في حزمتين تتحركان في اتجاهين متعاكسين ويتفانى أحدهما مع الآخر. وعند تحرير هذه الطاقة بعد التفاني يتولد منهما عدد كبير من الجسيمات التي كان يؤمل أن يظهر بينها أحد البوزونين W أو Z، إذ اختيرت الطاقة 540GeV لتعطي جسيمات كتلها مطابقة لكتلتي W و Z المتنبأ بهما نظرياً؛ وقد أعلن فريق CERN فعلاً في تموز / يوليو عام 1984 أنهم وجدوا ستة من هذه الحوادث بين نحو مليار حادث مسجل على ألواحهم الفوتوغرافية، ولكن ما من حالة بينها لوحظ فيها البوزون نفسه، لأنه يتفكك في 10^{-20} ثانية (أي في جزء من مئة مليون تريليون من الثانية)، ولكن افتُرض أنه يتفكك إلى لبتون (أو لبتون مضاد) ونترينو مضاد (أو نترينو). وهكذا وجد فعلاً أثر عمودي على اتجاه الحزمة ففُسر بأنه هو أثر إلكترون عالي الطاقة. أما غياب أثر معاكس لأثر الإلكترون على اللوحة الفوتوغرافية (وهو أثر يتطلبه مبدأ انحفاظ

الاندفاع) فقد عُدّ دليلاً على أن هناك نترينو مضاداً كان قد ظهر فعلاً مع الإلكترون ولكنه لم يترك أثراً لأنه عديم الشحنة.

ولا يستطيع المرء أن يتجنب الإحساس بعدم الرضى تجاه هذا النوع من الفيزياء لأن جزءاً كبيراً منها يقوم على وجودٍ افتراضي لجسيمات لا يمكن مشاهدتها ، ففي الإعلان عن اكتشاف -W مثلاً ، كما مر ذكره منذ قليل ، يناقشون الأمر بأن وجود أثر للإلكترون مع عدم وجود أثر يوازيه هو دليل كافٍ على ظهور -W . ولكن هذا الاستنتاج يثير سؤالين : أولاً : لماذا لا يمكن أن يكون الإلكترون والنترينو المضاد قد تولدا مباشرة وليس عن طريق حالة جسيم متوسطة ؟ ثانياً : لماذا استُثني أثر الإلكترون من عشرات الآثار الأخرى الموجودة على لوحة التصوير ليعامَل معاملةً خاصة علماً بأنه لا شيء في مظهر أثر هذا الإلكترون يشير إلى أولويات أكثر مما في الآثار الأخرى ؟ إننا نذكر هذه النقاط لنشير إلى أن أسئلة كثيرة ما تزال بلا جواب ، لها صلة بتجارب مثل تجربة CERN ، وعلى المرء أن يخضع كل سمة فيها للدرس المكثف والتحليل الشديد.

علم الكونيات (الكوسمولوجية)

«قال الله: «ليكن نور فكان نور»».
ــ سفر التكوين 3:1

تعود بدايات علم الكونيات (الكوسمولوجية) إلى بداية الحضارة نفسها، لأنه ما من مجتمع، مهما كان قديماً، إلا وعُني عناية عميقة بأمر موقعه من الكون؛ ولا ريب أن منظر سماء الليل المرعب الذي خلا من القمر والغيوم أثار تأملاً في طبيعة الكواكب والنجوم ودرب التبانة، ولكن ذلك لم يدفع قدماء السومريين والمصريين والبابليين والكلدانيين والفينيقيين إلى تطوير علم عقلاني للكونيات مع أنهم طوروا فلكاً موضعياً دقيقاً كانوا يعتمدون عليه في ملاحتهم ووضع تقاويمهم وفي زراعتهم (فمعرفة تحولات المناخ مع تغيرات وضع الشمس كانت ضرورية من غير ريب)؛ ولكن تصورهم للكون كان ينطلق من أساطيرهم ومن لاهوتهم وتنجيمهم، لذلك كان يختلف من جماعة إلى أخرى وكان تصوراً بدائياً موصوفاً بصفات بشرية وليس له أساس عقلاني.

وكان اليونانيون أول من حاول تطوير كونيات عقلانية تقوم على أرصاد متأنية ومؤدية بالتالي إلى قياسات واختبارات. وربما كان فيثاغورس أول من بدأ الكونيات اليونانية بمحاولته تفسير حركات الكواكب بدلالة علاقات عددية بسيطة ثم تابع أفلاطون هذه الفكرة، ولكن حصيلة هذا العمل كله لم تكن بالشيء الكثير، لأن تفكير هؤلاء الفلاسفة اليونانيين الأوائل كان متعثراً جداً بسبب اعتقادهم بمركزية الأرض في الكون؛ وقد ظل هذا الاعتقاد سائداً على الرغم من معارضة أرسطرخوس الساموزي لهذا الاعتقاد (القائم على مركزية موضع الإنسان) مستخدماً منطقاً لا مأخذ عليه وأرصاداً متأنية لأوضاع الشمس والقمر بالنسبة إلى الأرض في مختلف أوجه القمر وأطواره، فبرهن أن نظام مركزية الأرض في النظام الشمسي يؤدي إلى نتائج سخيفة لا يمكن الدفاع عنها، غير أن أرسطرخوس لم يدوّن أبحاثه إلا في مؤلف واحد كان نصيبه الإهمال لقرون عديدة،

لذلك لم يكن هناك أتباع يونانيون يؤيدون نظريته هذه في مركزية الشمس، إلى أن أتى كوبرنيق، وبرر بعدما يقرب من 1800 سنة قبوله مركزية الشمس، بأن أشار إلى أن ارسطرخوس كان قد وضع سابقاً نظرية من هذا القبيل.

ومع أن معاصري أرسطرخوس من اليونانيين وأولئك الذين تبعوه لم يقبلوا كونياته فقد تابعوا أرصادهم الفلكية المتأنية واستخدامهم للرياضيات أينما أمكن ذلك. ثم بلغ هذا العمل ذروته فيما وصلوا إليه من دقة لا تصدق في الأرصاد السماوية التي أجراها هبارخوس بالعين المجردة وفي نظرية أفلاك التدوير epicycles التي وضعها بطليموس؛ ولكن علم الكونيات بوصفه نموذجاً لبنية الكون لم يتقدم كثيراً في نهاية العصر اليوناني القديم عما كان عليه في بدايته، ثم تبدل ذلك كله بعد أن نُشر كتاب كوبرنيق العظيم «نظرية في دوران الأجرام السماوية»، وأتى بعده يوهانس كبلر الذي اكتشف قوانينه الثلاثة في حركة الكواكب ونَشرها، ولولاها لما انطلق علم الفلك في مساره العقلاني الذي أدى في النهاية إلى علم الكونيات المتكامل. غير أن قوانين كبلر وحدها لم تزودنا بأساس كافٍ نستطيع أن نبني عليه علم الكونيات لأنها قوانين تجريبية حسية ليس فيها تلك العمومية التي تسمح لنا بأن نتوصل منها إلى استنتاجات بشأن الأجرام السماوية كالمجرات خلف منظومتنا الشمسية، فكان يجب أن ننتظر حتى مجيء نيوتن وقوانينه في الحركة والثقالة لكي نشاهد تطوير علم كونيات مبني على مبادئ أساسية كونية. ولكن أرصاد غاليليو بمقرابه كانت قد أعطت قبل ذلك بعض الأدلة على وساعة الكون وأثبتت أن الكونيات كان يجب أن تتطور على مستوٍ أعظم بكثير مما ارتآه اليونانيون، وكانت طبيعة درب التبانة سراً لآلاف السنين واستمرت على ذلك إلى أن جاء غاليليو ورصده بوساطة مقرابه واكتشف أنه يتألف من آلاف النقط المنفصلة من الضوء والتي عُرف أنها كلها نجوم مفردة، وقد استنتج من معرفته أن ضياء هذه النجوم ذاتي ومن ضآلة هذا الضياء أن درب التبانة بعيد عنا بعداً هائلاً هو أكبر كثيراً من أبعاد النجوم التي تُرى بالعين المجردة. ونحن نعرف اليوم أن درب التبانة يتألف من الأذرع الحلزونية (وهي تجمع غيوم نجمية) لمجرتنا والتي تمتد بيننا وبين مركز المجرة نفسها.

ولم يتطور علم الكونيات تطوراً عقلانياً مبنياً على مبادئ فيزيائية راسخة ومؤدياً إلى تحليل رياضي متين إلا بعد أن مهدت قوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة الطريق أمامه، وقد اتضح عندئذ لنيوتن أن حل المسائل الكونية لم يكن أكثر من حل مسائل في الثقالة تتدخل فيها حركة العديد من الأجسام الشبيهة بالشمس ولكنه عندما تأمل في هذه المسائل وجد ما بدا له أنه صعوبة لا يمكن تخطيها، لأنه إذا فرض أن الكون لا نهائي (وهذه فرضية لا تقبل الجدل) وأن عدد النجوم غير منته وأنها موزعة بانتظام في أنحاء الفضاء؛ أو إذا فرض أيضاً أن الكون لا نهائي وأنه يحوي عدداً منتهياً من النجوم التي تتبادل التأثير الثقالي، فإنه في الحالين لن نتوصل ولو تقديراً إلى نوع الكون الذي نراه، إذ لو كانت النقاط الكتلية (النجوم) موزعة بانتظام في جميع أرجاء الكون توزيعاً لا نهائياً

لما كان الحقل الثقالي وحيد التعيين في أي نقطة منه بل لأخذ أي قيمة نشاء. ولكي نفهم هذه الفكرة، نعتبر نقطة من كون من هذا القبيل ونمرر فيها سطح كرة لا على التعيين نصف قطرها R فتتوقف شدة الحقل الثقالي في هذه النقطة على الكتلة الكلية الموجودة داخل الكرة فحسب (أي على عدد النجوم داخلها)، أما النجوم الواقعة خارجها فلا تساهم إطلاقاً في الحقل الثقالي في هذه النقطة. وتتناسب كتلة الكرة، كما نعلم، مع حجمها وبالتالي مع مكعب نصف قطرها (أي R^3)، لذلك يتناسب الحقل الثقالي على سطح الكرة في النقطة المعطاة (طرداً مع كتلة الكرة أي مع R^3) وعكساً مع مربع نصف قطرها أي مع R^2، وهو لذلك يتناسب طرداً مع $\frac{R^3}{R^2}$ أي مع R. ولما كان باستطاعتنا اختيار كرة من أي حجم نشاء لكي تمر في النقطة المعطاة، لذلك يمكن أن نحصل على أي قيمة نشاء للحقل في هذه النقطة وهذه نتيجة لا معنى لها فيزيائياً فلا يمكن إذن أن يكون عدد النجوم لا نهائياً.

وكان هـ. و، أوبلرز H.W.oblers قد اعترض في عام 1890 اعتراضاً مماثلاً على توزع النجوم اللانهائي كان قد بناه على ظهور السماء مظلمة في الليل إذ بيَّن أنه لو كان توزعها لانهائياً لكان يجب أن تكون شدة الضوء الآتي إلى أي نقطة من الفضاء كبيرة بما يكفي لأن تبدو سماء الليل مضيئة إضاءة سطح أي نجم فلا تكون السماء مظلمة أبداً. ولقد أثار تحليل أوبلرز هذا اعتراضات محقة تقوم على محدودية حياة النجوم، إذ إن البعيدة جداً ستكون قد خمدت وأصبحت معتمة قبل أن يصل نورها إلينا بزمن بعيد، لذلك لا يصح إدخالها في الحساب. ولكن هذا الاعتراض لا يمس حجة الحقل الثقالي المناهضة للانهائية توزع النجوم.

أما اعتراض نيوتن على محدودية عدد النجوم في فضاء لانهائي فهو يقوم على أن توزعاً كهذا لا يمكن أن يتفق مع انتظام توزع النجوم الذي نشاهده حالياً، إذ لو صح ذلك لتبعثرت النجوم تبعثراً لا حدود له ولبدت السماء خالية تماماً، أو لكانت النجوم موزعة حول نواة مركزية إلا أنها تتفرق بانتظام كلما ابتعدت عن المركز؛ ويمكن أن نطبق هذا الاعتراض نفسه على محدودية عدد المجرات أو عناقيد المجرات في فضاء لانهائي، ولكن نيوتن لم يعرف المجرات ولا عناقيد المجرات؛ ومهما يكن من أمر، فقد أخرت هذه الصعوبات التي ظهرت في كونيات نيوتن وضع أي نموذج كوني حتى مجيء أينشتاين الذي طبق نظرية النسبية العامة (نظريته في الثقالة) على الكون بمجموعه وحصل على مجموعة من المعادلات الكونية التي أصبحت نقطة البداية لجميع علماء الكونيات، ولكن قبل أن ننظر في هذه المعادلات دعونا نصف الكون كما أظهرته لنا مختلف أنواع المقاريب المعتمدة على الأشعة الراديوية أو أشعة غاما أو النترينوهات التي وفرتها التقانة الحديثة للفلكيين. فنحن نستطيع اليوم دراسة الكون من منافذ إشعاعية وجسيمية لم يكن الفلكيون ليحلموا بها أو يتخيلوها قبل نصف قرن، وهم يستطيعون اليوم الاستعانة بخدمات إضافية من المقاريب الدوارة

(بوساطة الأقمار الصنعية) فيمكنهم بالتالي التخلص من التشوهات التي يحدثها الجو الأرضي.

لقد أظهرت البيانات الرصدية التي جمعت بوساطة هذه المقاريب المختلفة أنه مهما بحثنا بعيداً في الفضاء فإن لبنات بناء الكون تكون متجمعةً في مجرات تتماسك عناصرها معاً بتفاعلاتها الثقالية المتبادلة؛ فدرب التبانة أي المجرة التي نعيش فيها تنتمي إلى عنقود من المجرات ينتمي إليه أيضاً السديم الحلزوني الهائل في كوكبة المرآة المسلسلة Andromeda ونحو عشرين مجرة أخرى معه؛ ولما كانت مجرة المرآة المسلسلة تبعد عنا نحو 2,5 مليون سنة ضوئية، لذلك فإن قطر عنقودنا المحلي يقرب من 4 ملايين سنة ضوئية (السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة وتساوي تقريباً 10 تريليون كيلومتر، أي 10^{13} كم). وهناك العديد من العناقيد التي تحوي مئات بل حتى آلاف المجرات، فعنقود برج السنبلة Virgo الواقع على بعد 50 مليون سنة ضوئية يحوي 2500 مجرة مرئية، كما يتألف عنقود الهدرية Hydra، الذي يقع على بعد ملياري سنة ضوئية، من بضع مئات من المجرات.

والخاصة المهمة والمحيرة في هذه العناقيد هي أن مجراتها الفردية تتحرك بسرعة كبيرة حتى ليبدو أن العدد المشاهد منها قليل جداً بحيث يجب أن يُضرب بما يقرب من 100 لكي تكون قواها الثقالية كافية وتساوي ما يتطلبه تماسك العنقود، وهذه مشكلة كانت تُعرف باسم «سر الكتلة المفقودة» أو حالياً باسم «سر الكتلة الخفية»، إذ ما يمكن أن نشاهده من المادة أو ما يمكن أن نحسب حسابه من الباريونات العادية (النوى) لا يعادل إلا ما يقرب من 1% من كتلة الكون كلها، ولقد حيرت طبيعة هذه الكتلة الخفية الفيزيائيين والفلكيين في غضون الأعوام الخمسين الأخيرة أو نحو ذلك، ولكن ما نعرفه بالتأكيد هو أنها من طبيعة غامضة جداً حتى لقد عجز عن اكتشافها فلكيو المراصد على كثرتهم برغم أنهم كانوا يبحثون عنها بجد ومثابرة، وقد تكون هذه الكتلة الخفية هي السبب في الظواهر ذات الطاقة العالية المقترنة ببعض المجرات التي اكتشفتها مقاريب راديوية.

وليست المجرات نفسها سوى عشرات أو مئات المليارات من النجوم التي تتجمع في كل مكان وتنتظم إما في صورة بُنى إهليلجية متناسقة تماماً وغير متميزة، (وتدعى مجرات إهليلجية) أو في صورة بنى تتألف من قلب منبسط تخرج منه ذراعان حلزونيتان تبدآن من نقطتين (على محيط القلب) متقابلتين قطرياً وتلتفان حوله لتشكلا خمس أذرع حلزونية مختلفة (مجرات حلزونية) كما في مجرة المرآة المسلسلة، أو ثلاث أذرع كما في درب التبانة. ومعظم المجرات الحلزونية ليس لها سوى ثلاث أذرع يمكن أن تتبع أثرها من القلب بوساطة المقراب الراديوي لأن الهدروجين الحيادي،الذي يطلق إشارة راديوية محدَّدة جداً يمكن اكتشافها بسهولة بوساطة مقراب راديوي صغير، مركَّز في الأذرع الحلزونية لمجرات كهذه؛ ويستدل على هذه الأذرع أيضاً من غيوم الغبار المتسعة التي تؤلف مع الهدروجين المادة الخام التي تتولد منها باستمرار نجوم جديدة؛ فالأذرع الحلزونية هي إذاً

« حاضنات » النجوم . وقلب المجرة الحلزونية منتظم لا غبار فيه ، بل فيه قليل جداً من الهدروجين الحيادي فلا تتولد فيه نجوم جديدة . وقد قسم الفلكيون النجوم داخل المجرة ، وفقاً لذلك ، إلى فئتين : فئة النجوم القديمة جداً ، وهي توجد عادة في قلب المجرات الحلزونية وفي كل مكان من المجرات الاهليلجية ، وفئة النجوم الفتية كالشمس مثلاً والتي توجد في أذرع المجرات الحلزونية ولكن لا وجود لها في المجرات الاهليلجية . وتدعى أقدم النجوم ، وهي فقيرة بالمعدن ، نجوم « الجمهرة الثانية II »، في حين تدعى النجوم الأفتى ، أي النجوم الموجودة في الأذرع والغنية بالمعدن ، نجوم « الجمهرة الأولى I » . والحقيقة أن التعبير « غنية بالمعدن » (أو بالعناصر الثقيلة) هو تعبير نسبي لأن نسبة العناصر الثقيلة كلها في أجواء نجوم الجمهرة I (أي الكربون والأكسجين والحديد وغيرها) تبلغ تقريباً 3% ، في حين أن نسبة مثل هذه العناصر في جو نجوم الجمهرة II قريبة جداً من الصفر . ولما كانت الجمهرتان النجميتان تتألفان بصورة رئيسية من الهدروجين والهليوم (73% هدروجين و24% هليوم في الشمس) ، لذلك يؤخذ غياب العناصر الثقيلة من نجوم الجمهرة II دليلاً على أن هذه النجوم وُلدت في البدء من الهدروجين الأصلي والهليوم (ولم يكن هناك عناصر ثقيلة) في بداية الكون . وقد وُلدت معظم نجوم الجمهرة I بعد نجوم الجمهرة II بزمن يراوح من مئات الملايين من السنين إلى 5-6 مليارات عام وتولدت من مادة كانت قد أعدت في درجة حرارة عالية (ملايين الدرجات) في أفران داخل نجوم الجمهرة II ، وعندئذ لفظت إلى الفضاء بانفجارات هائلة (مستعرات فائقة Supernovae) . وقد اندمج نحو 3% من الهدروجين الأصلي والهليوم في قلب نجوم الجمهرة II وتحولت إلى نوى عناصر ثقيلة بدءاً بالكربون ، وهكذا وُلدت نجوم الجمهرة I من مادة غَنِيت بهذه الطريقة .

وتؤلف نجوم الجمهرة II المكونات الوحيدة لتجمعات النجوم الكروية التي تدعى « العناقيد المتكورة » والتي تكون الهالة المحيطة بقلب المجرة ، وهناك ما يقرب من 100 عنقود متكور يحوي كل منها ، في أي مكان منه ، مئة ألف إلى مليون نجم من نجوم الجمهرة II ، وتدور حول قلب درب التبانة ، إذ ربما تكون هذه التجمعات النجمية المتكورة الخالية من الغبار والغاز هي الأثر الباقي من ولادة مجرتنا مثلما هي أيضاً أثر من ولادة أي مجرة مرتبطة بها ثقالياً . وللمجرة خاصة مهمة أخرى هي أن شكل هالتها غير منتظم وهو قريب جداً من الشكل الكروي ويكاد نصف قطرها يعادل مثليْ قطر المجرة ، وطبيعة هذه الهالة المادية غير معروفة ، لذلك رأى الفلكيون أنه ربما كانت هالات المجرات هي التي تفسر بعض « الكتلة المفقودة » .

ويبلغ قطر المجرات التي تشبه درب التبانة نحو مئة ألف سنة ضوئية ، ويبلغ قطر قلب كل منها نحو خمسة عشر ألف سنة ضوئية وتحوي الواحدة نحو 200 مليار نجم ، فمجرة المرآة المسلسلة الحلزونية يقرب حجمها من ضعفي حجم درب التبانة وهي تحوي نحو 400 مليار نجم في مختلف مراحل النشاط والتطور مثل النجوم في درب التبانة .

لنلق الآن بالاضافة إلى هذا الوصف المختصر لنماذج المجرات نظرةً ثانية على تجمهر المجرات، لقد تبين من التحليل المتأني لتوزع المجرات في الفضاء أن المجرات لاتنتظم في عناقيد فردية فحسب بل إن هذه العناقيد نفسها تنتظم في عناقيد فائقة،من ذلك أن عنقودنا المحلي وعنقود السنبلة هما عنصران من عنقود فائق. ولكن الخاصة المذهلة في هذه العناقيد الفائقة هي أن شكلها لا يكون بالضرورة كروياً بل يبدو أنها خطية الشكل وقد تبدو أيضاً على شكل شرائط مخرّمة في الفضاء مثل نسيج العنكبوت على مرج أخضر، فمثلاً تبدو خيوط عناقيد المجرات مشدودة عبْر الفضاء مكوِّنة فجوات كروية واسعة تبدو بمظهر فضاء فارغ، ولكن الدليل على الفراغ في هذه الفجوات غير مؤكد وليس ما يمنع أبداً من أن تكون محتوية على كمية كبيرة من الجسيمات الثقيلة المعتمةَ.

ويرتبط تاريخ حياة النجوم ارتباطاً وثيقاً بالمسألة الكونية، كما أن تكوُّن نجم ما من غبار وغاز موزعين توزعاً لا شكل له هو ظاهرة ثقالية، غير أن القوى الطبيعية كلها تقوم بدور كبير الشأن أو صغيره في مختلف المراحل الموجهة لحياة النجم. وتشير أشكال النجوم بصورة جلية إلى أن القوة المتناظرة كرويا (الثقالة) هي التي كونت جميع النجوم. ولكن وجود محتوى خواص نجمية تختلف اختلافاً بينا من نجم إلى آخر يدفعنا إلى أن نتساءل عن سبب اختلافات كهذه، وهناك في الحقيقة وسيطان يحددان هذه الاختلافات وهما: كتلة غيمة «الغاز ـــ الغبار» التي انكمشت ثقالياً لتصبح نجماً ثم التركيب الكيمياوي لهذه الغيمة (متوسط وزنها الجزيئي الذي يتعين في الأساس بمحتواها من الهدروجين والهليوم). ومن الواضح بالحدس أنه إذا انكمشت تكوينة ابتدائية لا شكل لها من الغاز والغبار ولها تركيب معين وكتلة معينة ثم استقرت في حالة متوازنة فإنها لن تقوم بذلك إلا بطريقة واحدة، أي أن تكوينها الثقالي النهائي يكون وحيداً. لذلك فإن كتلة المادة الأولية الخام التي انبثق منها النجم وتركيبها الكيمياوي الابتدائي هما الوحيدان اللذان يحددان تاريخ حياة النجم.

ولكي نرى كيف يقوم كل من الكتلة والتركيب الكيمياوي بدوريهما المنفصلين في هذه المسرحية النجمية، دعونا نتصور عنقوداً من النجوم من مختلف الكتل التي سبق أن تكونت بالتشظي الثقالي لغاز وغبار كانا منتشرين في مدى واسع، فجميع النجوم في العنقود النهائي كانت متطابقة عند ولادتها في تركيبها الكيمياوي ولكنها تختلف بكتلها، أي أن التغيرات الملحوظة فيما بينها تعود بكاملها إلى اختلاف في كتلها؛ ولكي نرى ما دور الكتلة في هذه العملية دعونا نتأمل في قطعة ضخمة من الغيمة الابتدائية عند انفصالها وانكماشها ثقالياً. لا شك أن سرعة انكماشها تتوقف على كتلتها وعلى القوانين الأساسية للحركة والثقالة؛ فهذه القوانين، بالاضافة إلى قوانين الغازات والترموديناميك، تمكننا من متابعة الانكماش ورؤية الطريقة التي تتغير بها التشكلات الداخلية في كتلة الغاز والغبار المنكمشة؛ فنحن نعرف من مبدأ انحفاظ الطاقة وقانون الترموديناميك الثاني معاً أن الذرات والجزيئات الهاوية نحو الداخل لا يمكن أن تكوّن كرة مستقرة من الغاز إلا إذا

فقد التشكيل الكامل طاقةً تجعل أنتروبيته تزداد (لأن إطلاق الطاقة يعني زيادة الانتروبية) ؛ ويتم إطلاق الطاقة بأيسر السبل ، إذ تجذب قوة الثقالة الذرات والكتل فتتحرك هذه كلها بسرعة متزايدة باستمرار (فيتحوّل بذلك الكمون الثقالي إلى طاقة حركية) وتزداد بالتالي درجة حرارة التكوين الكلي فيطلق مع انهياره إشعاعاً بمعدل يتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة ؛ ولكن درجة الحرارة لا تنبئنا عن أصل هذا الإشعاع الكهرطيسي الذي يمكن أن ينشأ عن الشحنات الكهربائية المتسارعة ، ذلك لأن الإشعاع ينطلق من الإلكترونات داخل الذرات التي تأخذ في الاهتزاز عند تصادم بعضها مع بعض ، وكلما استمر انكماش التكوين نقصت طاقته ؛ ولكن لا بد أن يتابع انكماشه في حين ترتفع درجة حرارته لأن نصف ما انطلق من الطاقة الثقالية الكامنة فقط يتحول إلى إشعاع كهرطيسي ، أما النصف الآخر فيبقى في التكوين على صورة طاقة حركية (طاقة داخلية) ، وهذا ما يرفع درجة الحرارة باستمرار ، ثم تستمر هذه العملية إلى أن تبلغ درجة الحرارة المركزية 10 ملايين درجة كلفن ، فيتوقف الانكماش عندئذ لأن الاندماج النووي الحراري يبدأ عند تحول البروتونات (في فئات من أربع بروتونات) إلى نوى هليوم ، وعند هذه المرحلة يأخذ التكوين صورة النجم ويتعين مبدئياً نصف قطره وضياؤه ودرجة حرارة سطحه بكتلته التي تعيّن أيضاً سرعة تطور النجم . ويقوم تركيبه الكيمياوي بدور أساسي ولكنه صغير في هذا التطور ، فمحتواه من الهدروجين بالإضافة إلى درجة الحرارة يحددان إلى أي مدى يسرع في توليد الطاقة بطريقة اندماج البروتونات لتكوين نوى الهليوم ، كما تحدّد العناصر الثقيلة المعدَّل الذي يصل به الإشعاع المتولد من قلب النجم إلى السطح ؛ ففي نجم كالشمس مثلاً يصل الإشعاع المتولد من الاندماج النووي إلى السطح بعد نحو 30 مليون سنة ، وفي غضون ذلك تكون طبيعة الإشعاع قد تبدلت تبدلاً عنيفاً من أشعة غاما النشيطة جداً إلى إشعاع واهب للحياة هو الذي نتلقاه الآن من الشمس .

ولما كنا غير قادرين على النفاذ إلى داخل النجم لكي نقيس مختلف الوسطاء التي تحدّد الظروف الفيزيائية من نقطة إلى أخرى (مثل درجة الحرارة والضغط والكثافة) لذلك يجب أن نستنتج هذه الظروف من قوانين الفيزياء الأساسية التي تتحكم بباطن النجوم . ولا يمكن أن يصلنا الإشعاع من داخل النجوم في حين تصلنا النترينوهات . لكن المعلومات المحمولة عليها تصلنا غامضة ومشوشة ، غير أن المادة النجمية ، لحسن الحظ ، موجودة في الحالة الغازية (وهي حالياً غاز كامل) ، لذلك يمكن أن نطبق عليها قوانين الترموديناميك وقوانين الغازات المعروفة معرفة جيدة ؛ ولما كانت الطاقة التي تنتقل من باطن النجم إلى سطحه يتألف معظمها من إشعاع ، يجب أن نطبق أيضاً قوانين الإشعاع كما عدَّلتها نظرية الكم لكي نراعي مراعاة تامة تفاعل الإشعاع مع الذرات المتأينة حين تنتقل من باطن النجم إلى سطحه .

وكان الفيزيائي الفلكي العظيم البريطاني آرثرستانلي إدنغتون **A.S.eddington** هو الذي طور

معادلات باطن النجم الأساسية (وعددها أربع)؛ فهذه المعادلات تجسد قوانين الفيزياء الأساسية وتصف تغيرات ظروف النجم الداخلية عند الانتقال من نقطة إلى أخرى سواء إلى الداخل أم إلى الخارج في باطن النجم، وقد بيَّن إدنغتون أن الإشعاع هو الوسيلة الرئيسية في نقل الطاقة إلى داخل النجم ووضع المعادلة التي تصف هذه الوسيلة فكانت المعادلة النهائية التي احتاجها الفيزيائيون الفلكيون لتطوير الفيزياء الفلكية النظرية إلى الأداة التحليلية الدقيقة التي أصبحت اليوم أداةً لسبر بنية النجوم وولادتها وتطورها. ولكن لكي يمكن تطوير نموذج نظري مفصل للنجم كان لا بد من معرفة شيء واحد هو معلومات هامة عن آلية تولد الطاقة النجمية، وقد خمّن إدنغتون تخميناً صحيحاً توصل إليه من شدة ضياء النجم المعروفة، وهو أن النجوم تولد طاقتها باندماج البروتونات معاً لتكوين ذرة هليوم، ولكن من دون أن يعرف كيف تقوم النجوم بذلك لأن الفيزياء النووية لم تكن معروفة حين قام إدنغتون بعمله، فقد افترض علاقة عامة جداً بين وسائط باطن النجم فمكنته هذه العلاقة من حل المعادلات الداخلية والحصول على نماذج النجوم مع أقطارها وكتلها وشدات ضيائها القريبة من قيمها في الشمس. وقد لا تكون هذه الفروض حلاً مرضياً للمسألة الفيزيائية الفلكية، ولكنها كانت مهمة في ذلك العهد لأنها برهنت على أن المعادلات كانت في الطريق القويم حتى من دون معرفة لآلية الطاقة.

ولد السير أرثرستانلي إدنغتون (1882-1944) في كِندال Kendal في إنكلترة، وهو ابن معلم مدرسة من جماعة الكويكر* رحل عن الدنيا عندما كان عمر ابنه عامين فانتقلت أسرته بعد ذلك مباشرة إلى سمرست Somerset حيث أمضى أرثر أولى سنوات حياته. وقد استطاعت أمه، على الرغم من قلة المال؛ أن ترسله إلى مدرسة برِمْلين Brymmelyn التي ضمت، لحسن حظه، عدداً من المعلمين البارزين الذين غرسوا فيه حب الآداب القديمة والأساس المتين في الرياضيات. وقد نال آرثر على الرغم من طبيعته الخجولة درجات عالية في دروسه كما نال منحة دراسية إلى ما يعرف اليوم بجامعة منشستر، وقد تأثر الشاب إدنغتون طيلة وجوده في منشستر تأثراً خاصاً بالفيزيائي آرثر شوستر A.schuster وهو أحد أبرز أساتذته الذي شجعه على اهتمامه بالعلوم. وفي عام 1902 نال إدنغتون أيضاً منحة للدراسات في كلية ترينيتي في كمبردج، وبدأ دراسته هنا في خريف ذلك العام نفسه.

وقد قام إدنغتون أثناء السنتين الأوليين في كمبردج بدراسات مركزة في الرياضيات ومكّنه تهيؤه المتين الحصولَ على المركز الرفيع الأول في امتحانات درجة الشرف Tripos، فكانت هذه أول مرة على الإطلاق يحظى فيها طالب في سنته الجامعية الثانية بهذا الشرف [1]. وفي السنة التالية حصل على

---

* جماعة مسيحية تحارب الرق وتدعو إلى السلام ونالت جائزة نوبل عام 1947.



السير أرثر ستانلي إدنغتون (1882-1944)

إجازته في الرياضيات وعمل لمدة وجيزة معلماً خاصاً للرياضيات لكي يكسب عيشه ، ثم قَبل في عام 1906 تعيينه كبير المساعدين في المرصد الملكي في غرينويتش حيث أمضى سنواته السبع التالية وهو يتعلم ليصبح فلكياً . وقد كلَّف هذا المرصد إدنغتون بإنجاز مهام مختلفة مكنته من شحذ مهاراته في الفلك التطبيقي وساعده ذلك في أن يظل على صلة مع معظم المستجدات الحديثة في موضوع الفلك ، كما اختير بعد وقت قصير من استلام مهامه في غرينويتش زميلاً في الجمعية الملكية ، وبدأ عندئذ بحوثه في الفلك النظري عن التركيب الداخلي للنجوم مما وطد شهرته ، كما سافر في بعثات فلكية متعددة إلى مالطة والبرازيل . وفي عام 1913 تسلم منصب الأستاذية المجزي في كمبردج كما انتقل إلى المنزل الملحق بالمرصد لأنه عين مديراً له فأمضى فيه بقية حياته كلها [1] .

وكان التدريب الذي مارسه إدنغتون في المرصد الملكي خير معين له في بحوثه على البنى النجمية ، وكان اهتمامه منصباً على نظرية كارل شفارتزشِلْد **Karl Schwarzchild** في التوازن الإشعاعي لجو النجم مع باطنه [2] ، فأثبت إدنغتون أن الاشعاع النجمي المتجه إلى الخارج يولد ضغطا في الغاز يوازن تماماً ثقل أغلفة كتلة النجم الخارجية ، وأن هناك علاقة مباشرة بين كتلة النجم ومعدل ما يشع من الطاقة ، أو بعبارة أخرى إن نجما كتلته عدة أضعاف كتلة الشمس لا بد أن

يكون عمره بالمقابل أقصر من عمرها . « وقد استنتج إدنغتون أن هناك عدداً قليلاً نسبياً من النجوم تفوق كتلتها عشرة أضعاف كتلة الشمس وأن النجم الذي تعادل كتلته خمسين مرة من كتلتها نادر إلى حد كبير » [3] . وقد تأكد هذا الاعتقاد بعد الأرصاد التي أثبتت أن هناك فيما نشاهـده من الكون عدداً قليلاً نسبياً من النجوم التي كتلتها بهذه الضخامة . وقد حسب إدنغتون أيضاً أقطار عدد من النجوم العملاقة الحمراء وطبق حساباته على القزم المرافق للشعرى اليمانية (النجم Sirius) ، « وحين حصل على قطر صغير بلغت معه كتلة النجم الحجمية ما يقرب من 50000 غرام /سم^3 قال إدنغتون عن هذه النتيجة إن معظم الناس أضافوا إليها ذهنياً عبارة (هذا غير معقول) » . وعلى الرغم من أن تقدير إدنغتون قد أثار الدهشة لدى البعض فقد أكد الفلكيون في مرصد جبل ولسون صحة حسابه . إذ وجدوا أن انحراف خطوط طيف النجم نحو الأحمر قريب جداً من النتائج التي تقتضيها نظرية أينشتاين النسبية .

وكان استنتاج إدنغتون الآخر الذي لا يقل تورية عن سابقه هو أن معدل إشعاع النجوم التي كتلتها تساوي كتلة الشمس يستدعي أن يبلغ سلّم زمن تطورها عدة تريليونات سنة فيما لو اعتمدت نتائج هُرتز سبرُنْغ ــ رسّل ــ Hertzsprung Russel في تعاقب ألوان النجوم وشدات ضيائها [4] . وكان إدنغتون يرى أنه ما من منابع معروفة للطاقة الكيمياوية يمكن أن تحافظ على النيران النجمية متأججة كل هذه المدة ، لذلك اقترح في عام 1917 أن النجوم تتقد بفضل عمليات نووية ؛ وكان إدنغتون قد افترض هذا قبل أكثر من عشرين عاماً من اكتشاف أوتوهان وليزميتنر للانشطار النووي ، لذلك قوبل بشك كبير ، ومع ذلك فقد ظل إدنغتون يجادل أنه ما من منبع للطاقة مناسب يمكنه أن يجاري النجم في طاقته ، ولكن حجته قُبلت في نهاية الأمر عام 1938 عندما نشر هنْزبيث Hans Bethe نظريته عن دورة الكربون وأهميتها في الطاقة النجمية .

وكان إدنغتون قد أصبح في الوقت نفسه أحد أوائل الخبراء في النظرية النسبية فكان أول بريطاني يتلقى نسخة من بحث أينشتاين الشهير في نظرية النسبية العامة عام 1916 واستوعب بسرعة تعقيدات رياضياتها وكان مسؤولاً إلى حد كبير عن قبول الأوساط العلمية البريطانية لنظرية النسبية العامة وذلك بفضل تقريره ، عن نظرية النسبية في الثقالة ، الذي رفعه إلى الجمعية الفيزيائية في لندن عام 1918 ، كما أن شرحاً مبسطاً لنظرية النسبية العامة عنوانه : المكان والزمان والثقالة ، فزاد هذا الكتاب من اهتمام الجمهور بأعمال أينشتاين . وفي عام 1919 قدم إدنغتون ما يلزم من مشاهدة حسية لإثبات صحة تنبؤ نظرية النسبية العامة الأساسي ونعني به انحناء مسار الضوء بالثقالة ، إذ إنه قاد بعثة إلى جزيرة برنسيب في خليج غينية لكي تصور كسوف الشمس ، وكان إدنغتون منهمكاً جداً في تبديل ألواح التصوير في أثناء الكسوف فلم يستطع مشاهدته مباشرة ، ولكن ما أن تم تظهير الألواح حتى ثبت انعطاف ضوء النجوم المار بالقرب من حافة الشمس ، فأعلن عندئذ أن نظرية

النسبية العامة مؤكدة فعلاً ؛ ويُروى أن أينشتاين سئل بعدما أخطر بإثبات إدنغتون التجريبي للنظرية ماذا سيكون شعوره لو لم يثبت انحناء الضوء الذي تنبأ به ، فرد أينشتاين «إذاً لأسفت كثيراً من أجل اللورد (يعني السير إدنغتون) لأن النظرية صحيحة » . وفي عام 1923 نشر إدنغتون كتابه نظرية النسبية الرياضية الذي اعتقد أينشتاين نفسه أنه أرقى عرض كتب في هذا الموضوع على الإطلاق .

وفي العشرينيات من هذا القرن استبدت بإدنغتون فكرة صياغة نظرية كبيرة توحد نظرية النسبية مع نظرية الكم فرأى أن ثوابت الطبيعة الأساسية كسرعة الضوء مثلاً وثابت بلانك هي المفتاح الذي يفضي إلى هذا المسعى ، فتوصل إلى تقدير عدد الجسيمات الموجودة في الكون ولم يختلف تقديره كثيراً عن القيم المسلم بها حالياً بوجه عام ، كما قدر قيم ما يقرب من 25 ثابتاً فيزيائياً ، ولكن جهوده تعرقلت لسوء الحظ بسبب صعوبات التوفيق بين النظريتين وكذلك بسبب تعويله على تعميمات تتعلق بمدلول هذه الثوابت الفيزيائية التي لم تكن مدعومة بالبيانات التجريبية الحسية . ومع ذلك فقد وجد الوقت أيضاً ليؤلف سلسلة من الكتب المبسطة في الفيزياء وفي علم الكونيات مما جعله أول من بسط العلم للجماهير في زمانه . ثم بدأت تزداد لديه القناعة بأن الحقيقة تأتي عن طريق نوع من الإلهام الصوفي الباطني بدلاً من أن تأتي عن طريق النظريات العلمية مع أنه كان قد طور نظرية في الميكانيك المصفوفي تعادل النظرية التي طرحها بول ديراك . على أن فلسفة إدنغتون الذاتية ، وإن أُغفلت اليوم بوجه عام ، فقد سبق أن عُرضت بإيمان واقتناع وكانت صادقة كقياس منطقي فلا تجيز أي استثناء أو اعتراض . ولا شك أن إيماناً كهذا يسبق عادة كل نظرية تُرمى فيما بعد في سلة المهملات ، ومع ذلك فإن الخيال الذي أضفاه إدنغتون على أبحاثه في النجوم والنسبية عمَّ أيضاً نظريته الأساسية .

وفي عام 1936 طور هنزبيث ، بعد التقدم السريع الذي حدث في الفيزياء النووية بعد اكتشاف النترون ، نظرية في عملية الاندماج الحراري النووي لكي يفسر بها إنتاج الطاقة في النجوم (انظر الفصل 18) ، إذ إنه حلل عمليتين مختلفتين لاندماج الهدروجين الحراري النووي وتحوله إلى هليوم : أولاهما هي سلسلة البروتون ــ بروتون التي يندمج فيها ، بسلسلة من الخطوات ، أربع بروتونات لتكوين نواة الهليوم ، والثانية هي دورة الكربون ــ الآزوت الشهيرة وفيها تندمج أربع بروتونات أيضاً لتكوين نواة الهليوم ، ولكن ليس بطريقة مباشرة إذ يقوم الكربون بدور الوسيط . وتحدث سلسلة البروتون ــ بروتون عند الأسّ الرابع لدرجة الحرارة المطلقة (نحو 10^4 كلفن) ، أما دورة الكربون فتحدث عند الأس عشرين لدرجة الحرارة المطلقة (نحو 10^{20} كلفن) ؛ فسلسلة البروتون ــ بروتون تتم ، بسبب ارتباطها بدرجة حرارة منخفضة ، في النجوم التي لها كتلة الشمس ، أي النجوم الصغيرة الكتلة . أما دورة الكربون التي تحتاج إلى درجة حرارة أعلى بكثير فتشيع في النجوم العظيمة الكتلة . وتفسر ظاهرتها عظم الضياء الكبير جداً في النجوم الزرقاء ــ البيضاء مثل

رجل الجوزاء Rigel (في كوكبة الجوزاء Orion) الذي يبلغ ضياؤه ما يقرب من 65000 مرة من ضياء الشمس.

وما أن بدأت الفيزياء الفلكية بدمج معادلات بيث المتعلقة بتوليد الطاقة الحرارية النووية في معادلات إدنغتون لباطن النجوم حتى اندلعت الحرب العالمية الثانية وهكذا عُلقت كل الأعمال في هذا المجال المثير في الفيزياء إلى ما بعد الحرب، ثم اتسع العمل فيه بعدها اتساعاً سريعاً بسبب توفر الحسابات الإلكترونية العالية السرعة، وكانت النماذج النجمية التي أمكن الحصول عليها تتفق اتفاقاً مذهلاً مع خواص النجوم المرصودة وفي مجال واسع من خصائص النجوم (الكتلة، الأقطار، درجة حرارة السطح، التركيب الكيمياوي). وتشير هذه النماذج بوضوح إلى أهمية الكتلة والتركيب الكيمياوي في بنية النجم وتثبت بأن هذين الوسيطين يحددان بنيته تحديداً وحيداً؛ فكان هذا من أروع الأمثلة في تاريخ الفيزياء عن ارتباط منظومة فيزيائية (أي النجم) بمجموعة من المعادلات (أي القوانين الفيزيائية المعبر عنها رياضياً). ويثبت نموذج الشمس المستنتج من هذه المعادلات أن درجة الحرارة المركزية في الشمس تبلغ نحو 15 مليون درجة كلفن وأن الكتلة الحجمية في مركزها تبلغ 150 غراماً في السنتمتر المكعب.

ولقد ساعد تزايد البيانات النووية الهائل، الذي أعقب الحرب، الفيزيائيين الفلكيين على المضي قدماً إلى ما هو أبعد من نماذج النجوم بمفردها وأن يتقدموا في عرض نظريات عن تطور فئات النجوم فأتت متفقة أروع اتفاق مع الأرصاد. وقد ظلت كتلة النجم هي العامل الحرج في تطوره: فكلما كانت كتلة النجم أكبر كانت سرعة «حرق» وقوده النووي أكبر وكان أسرع أيضاً في تطوره؛ كما أن كتلة النجم تحددها حالته النهائية وهل سينتهي أخيراً إلى قزم أبيض ونجم نتروني أم إلى ثقب أسود، فالنجوم كلها تتطور بحرق هدروجينها في بادئ الأمر لإنتاج الهليوم، ثم عندما تصل إلى مرحلة العملاق الأحمر تحرق الهليوم الذي فيها لتحوّله إلى كربون. والنجوم التي لها كتلة الشمس لا تتجاوز مرحلة الكربون هذه لأن كتلتها ليست كبيرة بما يكفي لأن ترغم درجة حرارتها على أن ترتفع إلى أكثر من بضعة مئات الملايين من الدرجات التي هي ضرورية لكي تتحول نوى الكربون إلى نوى عناصر أثقل. وهكذا فإن الشمس ومثيلاتها تستقر على وضع الأقزام البيضاء بعد أن تمر بمرحلة العمالقة الحمراء، فهي إذاً بمنأى عن الانكماش إلى أبعد من ذلك نتيجة ضغط الإلكترونات الحرة لأن هذه الالكترونات تكون في حالة تردٍ degenerate، فهي تتحرك حرة بين النوى الثابتة نسبياً والمرصوص بعضها بجانب بعض، فمادة القزم الأبيض إذاً تتصرف تصرف المعادن.

أما النجوم التي تتجاوز كتلتها كتلة الشمس فلا يمكن أن تستقر على حالة قزم أبيض بل تواصل انكماشها إلى أبعد من حالة القزم الأبيض إلى أن تُدفع الإلكترونات قسراً إلى داخل النوى الثقيلة وتتحول البروتونات النووية إلى نترونات؛ ولما كانت هذه النوى غير مستقرة فإنها تُطلق نترونات

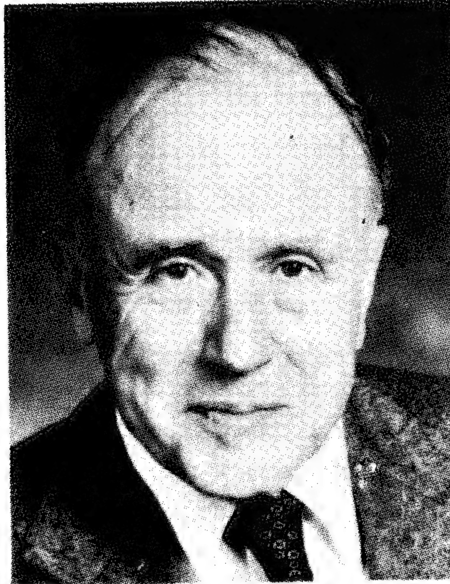
ونترينوهات إلى أن يتألف النجم كله تقريباً من نترونات وعندئذ يصبح نجماً نترونياً ويصبح قطره عدداً قليلاً من الكيلومترات وكتلته الحجمية تقارب مليارات طن في السنتمتر المكعب بالإضافة إلى أنه يدور أيضاً حول نفسه بسرعة كبيرة جداً ويكون محاطاً بحقل مغنطيسي شديد جداً ، وما يمنعه من الانهيار الثقالي بعد ذلك هو الضغط الذي تمارسه نتروناته المتردّية .

وحين يكون النجم ذا كتلة كبيرة جداً (10-15 مرة من كتلة الشمس) يواصل انهياره إلى أبعد من حالة النجم النتروني ويصبح في أغرب حالة معروفة من حالات تضخم المادة ، أي يصبح ثقباً أسود ، وهي الحالة التي طور نظريتها جون أرشيبالد ويلر **John Archibald Wheeler** إلى أقصى الدرجات وأعطاها اسمها المناسب جداً ، ففيها يبلغ الانضغاط الثقالي أقصاه ، ولا بد لدراسة الثقوب السوداء من تطبيق نظرية النسبية العامة ، وهذا ما فعله ويلر ، لأن الزمكان في جوار الثقب الأسود منحن إلى أبعد الحدود ، ولكن يمكن للمرء أن يفهم خواص الثقوب السوداء الأساسية من دون أن يمعن في تفاصيل نظريتها المعقدة ؛ وذلك بتطبيق نظرية نيوتن الثقالية التي أجرى عليها التعديل المناسب لكي تأخذ بعين الاعتبار انحناء الزمكان ، فحين ترتصّ كرة كبيرة الكتلة ، كنجم كثيف مثلاً تصبح قوة الثقالة على سطحه عظيمة جداً حتى لتصبح سرعة الإفلات منه هي سرعة الضوء ، وعندئذ يغدو النجم غير مرئي لأن الضوء نفسه لا يستطيع الفكاك منه ؛ وهذا ما يمكن فهمه بطريقة عامة من نظرية نيوتن ، ولكن هذا لا يعني الاستغناء عن النسبية العامة حين يراد فهم فيزياء الثقوب السوداء وتحليلها تحليلاً كاملاً . ولما كانت الثقوب السوداء غير مرئية فإنه لا يمكن الاستدلال عليها إلا من سلوك النجوم المرئية التي تدور حولها ، فالمنطقة الضئيلة غير المرئية مثلاً التي تطلق أشعة سينية تلاحظ في كوكبة البجعة **Cygnus X-1** التي يدور حولها نجم عظيم الكتلة كل 6 أو 5 أيام . ونستنتج من هذا أن منبع الأشعة السينية غير المرئي هو ثقب أسود تسقط فيه مادة من النجم الكثيف المرئي .

يعد جون أرشيبالد ويلر من أوسع فيزيائيي جيله خيالاً وأكثرهم تعدد مواهب . ولد عام 1911 في جاكسون فيل في فلوريدا وكان كلا والديه أمين مكتبة فأثرت نظرتهما إلى الكتب والتعلم في قرار ابنهما بأن يصبح عالماً ، وقد أظهر بشائر نبوغه في سن مبكرة وتابع دراساته بكل جد وعناية حتى إنه نال دكتوراه الفلسفة في الفيزياء من جامعة جون هوبكنز وهو في الواحدة والعشرين من عمره ثم أمضى ، بعد أن أتم بحثه للدكتوراه ، سنة مع غريغوري برايت **G.Breit** في جامعة نيويورك وسنة ثانية مع نيلز بور في كوبنهاغن حيث كان منكباً على الأبحاث النووية ، ثم التحق بعدها بالكلية في جامعة شمال كليفورنية حيث علّم لمدة ثلاث سنوات «ووصف (في عام 1937) بنية الزمرة المجاوبة في النوى الخفيفة (البسيطة) وأعطى الصيغة الرياضية لبناء دوال (توابع) الموجة النووية مع أخذ هذه البنية بعين الاعتبار ، وبيّن كيف تعطي هذه المقارنة نتائج من بينها وسائل لتقدير كمون فعلي لتفاعل أحد جسيمات ألفا مع آخر ، فقد تبين أن هذا الكمون يتوقف على متجه السرعة» [5] . وفي هذا العام

نفسه صاغ ويلر مفهوم المصفوفة المبعثِرة وبيَّن أهم خواصها الرئيسية مبدعاً في ذلك وسيلة نظرية ساهمت في الأبحاث التي قام بها فرنر هايزنبرغ وآخرون في فيزياء الجسيمات الأولية [5] .

وفي عام 1938 غادر ويلر تشابلهِلْ Chapelhill إلى برنستون حيث واصل بحثه في النواة الذرية فبلغت هذه أوجها في عام 1953 عندما وضع «نموذج نواة الذرة الكلي» الذي يميز حالات النكليونات الإفرادية من النواة ككل [5] . ثم أدخل أيضاً بنية الزمرة المجاوبة في الفيزياء الذرية . ولكن قد يكون أعظم عمل جدير بالذكر هو ما حدث بعد الأزمة السياسية التي أشعل شرارتها تفجير الاتحاد السوفييتي لقنبلته الذرية في عام 1949 ، إذ أنهى هذا التفجير احتكار امريكا للأسلحة النووية ، فانضم ويلر عندئذ إلى إدوار تيلر E.Teller في لوس آلاموس لكي يرى معه إمكان صنع قنبلة هدروجينية ، وعاد بعدئذ إلى برنستون ليشرف على جهود سرية غايتها ابتكار فيزياء نووية لنوعيات من وسائل تفجير مغذاة بالهدروجين كوقود . وقد تكللت بحوثه هذه ، التي دعيت مشروع ماترهورن Matterhorn ، بنجاح عندما تم اختبار القنبلة الهدروجينية في عام 1952 . وعلى الرغم من أن تصميم الأسلحة النووية وخواصها التقنية قد اختلفت كثيراً منذ أيام مشروع ماترهورن ، فقد طور ويلر ومعاونوه عدة صيغ وأساليب شذبها بعد ذلك الفيزيائيون في المختبرات الوطنية وظلت هي الأساس الذي بُني عليه تصميم كل الأسلحة النووية [6] .



جون أرشيبالد ويلر (1911-)

وبعد أن أكمل ويلر مهامه الحكومية بقليل تحول باهتمامه نحو نظرية أينشتاين في النسبية العامة لكي يفهم العلاقة بين الجسيمات والحقول فهماً جيداً، فعمل مع تلميذه المجاز رتشارد فاينمان. وفي أثناء ذلك انتهى ألى أن تأويل الطبيعة هندسياً بالطريقة التي ارتأتها نظرية النسبية العامة يعني أن الجسيم أساس لا يلائم التأمل في الطبيعة لأن المادة كلها ليست في الحقيقة سوى نتاج ثانوي لانحناء الزمكان، بل يمكن أن نشبه محاولة فهمنا للطبيعة بدلالة الجسيمات بمحاولة فهم المحيط بالنظر إليه من فوق سطحه. ومهما يكن من أمر فإن ويلر انساق بتصوره الهندسي للطبيعة إلى محاولة الربط بين نظرية الكم ونظرية أينشتاين في النسبية العامة عن طريق تطويره لمخطط احتمالي لا يوصف في المكان بهندسة واحدة بل يتردد بين هندسة وأخرى (7)، فقد رأى أن الفضاء يبدو كأنه مُزبد على الصعيد المجهري وأنه يتميز بتقلبات عنيفة على مستوى أطوال بلانك ($1,6 \times 10^{-33}$ سم)؛ وقد ابتكر ويلر عبارة (فضاء فائق) للدلالة على هذا الميدان (الفضاء) الغريب الذي نجد في كل نقطة منه هندسة مستقلة كاملة ثلاثية الأبعاد. وكانت اضطرابات هذا الفضاء الفائق عند ويلر هي المسؤولة عن المظاهر الجسيمية، أي أن الجسيمات ليست سوى الصور التي تخلقها لنا تموجات زبد هذا الفضاء الفائق.

بل إن ما أثار دهشة ويلر، نتيجة أبحاثه النظرية في النسبية العامة، هو ديناميك الارتصاص الثقالي، لأنه بعد أن سار على خُطى فكرة سبق أن أدخلها بيير لابلاس وجون مِتْشِل منذ أكثر من قرن، وجد أن النجم الذي يعادل ثلاث شموس على الأقل (أي كتلته ثلاثة أمثال كتلة الشمس) ما أن يتوقف أتونه الحراري النووي عن الالتهاب حتى يرتص إلى ما دعاه ويلر «حالة الثقب الأسود»، أو باختصار، لن يستطيع النجم مقاومة قوة جوه المدمرة داخليا مدة طويلة فيتهاوى بالتالي على نفسه إلى أن يغدو قطره صغيراً لا يتجاوز كيلو مترات قليلة، وتصبح شدة الحقل الثقالي على سطح جرم كهذا (أي الثقب الأسود) كبيرة بسبب ازدياد كثافته الهائلة حتى تمنع الضوء نفسه من الإفلات منه وتجعل النجم محجوباً لا يُرى. وقد اقترح ويلر نتيجة أبحاثه الطليعية الكثيرة في فيزياء الثقوب السوداء، بأن الكون نفسه قد يكون واقعاً داخل ثقب أسود عملاق لأن كتلته يمكن أن تحني الفضاء انحناء يكفي لأن يمنع الإشارات الضوئية من أن تستطيع مغادرة هذا الكون. وقد افترض ويلر أيضاً أننا إذا كنا نعيش في كون يتوسع فإن من الجائز عندئذ أن ينقلب يوماً ما هروب المجرات وتباعدها إلى ارتصاص المادة كلها والطاقة أيضاً نحو عقدة وحيدة للمادة والفضاء اللذين قد ينضغطان ويزولان من الوجود. ولكن كثيراً من الفيزيائيين لم يكونوا موافقين على نظرته الهندسية إلى الطبيعة ورأوا أن محاولته لتوحيد نظرية الكم مع نظرية النسبية هي محاولة متصدعة من أساسها؛ ومع ذلك قام ويلر، أكثر من أي فرد آخر ما عدا أينشتاين، بمحاولة تفسير جميع ظواهر الطبيعة على الصعيدين المجهري والجهري بدلالة هيكل هندسي واحد على الرغم من أن فائدة كل محاولة كهذه لا تزال موضع نقاش محتدم.

على أن النتيجة المهمة التي نجمت عن تطور النجوم العظيمة الكتلة هي أن هذه النجوم هي التي كوّنت جميع العناصر الثقيلة التي تشاهد الآن في الكون، إذ تبلغ درجة الحرارة في قلب هذه النجوم العملاقة مليارات الدرجات، مما يدفع بالنوى الخفيفة لأن تتحرك داخلها بسرعة كبيرة تكفي لأن تندمج عند اصطدامها وتكوّن نوى ثقيلة. ولكن هذه النجوم العظيمة الكتلة، التي تكون قد كوّنت قلبها الحديدي في المرحلة الختامية من تطورها، ترتص بعنف ثم تنفجر وتصبح مستعراً فائقاً. أما القلب الحديدي الذي ينضغط في هذه العملية ضغطاً هائلاً نتيجة الارتصاص، فإنه سرعان ما يتحول إلى نجم نتروني يدور حول نفسه، وتنتشر المادة المتفجرة بسرعة مبتعدة عن القلب فتحقن الغيوم المادية بين النجوم بالنوى الثقيلة وتغذّيها بالمادة الخام لتكوين جيلٍ ثانٍ من النجوم.

وثمة مَعْلمان من الكون هما من أهم معالمه لفهم ديناميكيته: الأولى منهما هي أنه سبق أن اكتشفت أجرام في غاية اللمعان والضياء تقع على مسافات بعيدة جداً، ونعني بها الكوازارات quasars (أو أشباه النجوم) الشهيرة التي تبعد عنا بمليارات السنين الضوئية. إن هذه الأجرام هي أبعد كل الأشياء التي شوهدت على الإطلاق، وهي تبدو على لوحات التصوير مثل النجوم ولكن بعدها الهائل عنا يشير إلى أنها أيضاً أعظم ما عُرف من تركيزات المادة ضياءً، إذ يقع أبعد كوازار معروف على مسافة تقرب من 10 مليارات سنة ضوئية عن كوكبنا؛ ويزداد عدد الكوازارات في حجم معين من الفضاء كلما ازدادت أبعادها عنا، ومع ذلك تنبئنا الكوازارات شيئاً عن بواكير كوننا (أي كيف كان الكون منذ مليارات السنين)، إذ لكي يبدو الكوازار على لوح التصوير في مثل صورة النجم العادي، مهما كان بعده شاسعاً، يجب أن يكون جرما ذا ضياء خارق. ويقدر الفلكيون من كل الشواهد المرصودة التي تخص الكوازارات أن ضياء كوازار نموذجي يجب أن يعادل ضياء مئة مجرة، لذلك لا يزال مصدر طاقة الكوازار سراً عظيماً، إذ ليس بين الأشياء التي نعرفها عن حقول القوى أو عن الجسيمات ما يمكن أن يفسر منابع للطاقة المركزة كهذه.

والمعْلم المهم الثاني في الكون الذي يتضمن معلومات هامة عن ديناميكيته الكونية هو تلك الخلفية الإشعاعية (الكونية) التي تغمر الفضاء بأسره، فقد اكتُشف هذا الإشعاع مصادفة في عام 1965 من قبل آرنو آلان بنزياس A.Penzias. وروبرت وُدْرو ولسن R.Woodraw Wilson بوساطة مقراب راديوي، وهو إشعاع طويل الموجة يأتينا بانتظام من جميع جهات الفضاء، كما أنه إشعاع حراري بارد جداً يصدر عن جسم أسود لأن فيه كل صفات الإشعاع الحراري المنطلق من فرن درجة حرارته 2,7 كلفن، وهو معلم مهم جداً في كوننا الحالي لأنه يؤكد الاستنتاج النظري المتعلق بحالة الكون في بداياته، كما يساعد علماء الكون على الاختيار الصحيح بين نموذجين للكون يتمسك بهما فريقان من الأنصار ظلا يتنازعان لمدة سنوات. وتقودنا هذه النتيجة (الخلفية الإشعاعية) إلى ديناميكية الكون وإلى الإجابة عن السؤال: هل الكون ساكن (مستقر) أم أنه متوسع؟ وإذا كان متوسعاً فهل سيتوسع إلى الأبد أم سيتوقف في زمنٍ ما بعيد ثم يبدأ بالارتصاص؟

دعونا أولاً ندرس هذا السؤال من الوجهتين النظرية والرصدية في آن واحد لأن هاتين الوجهتين سارتا معاً متعاونتين في هذا المجال المثير من الفيزياء، على الرغم من أن هذا التوافق لم يكن نتيجة تصميم وإنما مصادفة. ففي عام 1912 اكتشف ف. م. سليفر V.M.Slipher أن في خطوط طيف المجرات انحرافاً نحو الأحمر أو نحو الأزرق، الأمر الذي يشير إلى أن المجرات الواقعة وراء مجرتنا إما أن تكون مبتعدة عنا وإما أن تكون مقتربة منا، وأن المجرات الواقعة خلف مسافة معينة، تبتعد كلها عنا بسرع متزايدة. ولكن دليل سليفر الرصدي لم يكن حاسماً بما يكفي لأن يؤدي إلى أي نتيجة مثيرة بشأن سلوك الكون بمجمله. وبعد عشر سنوات من ذلك بدأ إدوين هبْـل E.Hubble دراسة منظمة لطيوف المجرات البعيدة فحصل على أدلة رصدية لا جدال فيها بأن المجرات البعيدة تبتعد بسرع تتناسب خطيا مع أبعاد المجرات عنا، وعندئذ نص على هذه الظاهرة بصورة قانون (قانون هبْل) يعطي معدل ابتعاد المجرة البعيدة في وحدة المسافة، وقد دعي هذا العدد «ثابت هبل»، وتقدر قيمته حالياً بنحو 16 كيلو متراً في الثانية لكل مليون سنة ضوئية بيننا وبين المجرة المدروسة؛ ولكن هذه القيمة ما تزال محاطة ببعض الشك وإن كانت أعمال هبل التي استغرقت اثنتي عشرة سنة مقبولة عالمياً بأنها دليل على توسع الكون.

كان إدوين باول هبل Edwin Powell Hubble (1889-1953) أعظم فلكي على الإطلاق ظهر في الولايات المتحدة. فهو المسؤول إلى حد بعيد عن تطور دراسة الفلك المتعلق بالمجرات الخارجية وجمْع الشواهد الرصدية التي تثبت أن الكون يتوسع، كما أن تأكيده بأن المجرات تتحرك مبتعدة إحداها عن الأخرى أتاح لبعض علماء الكونيات مثل الأب جورج لومِتْر A.G.Lemaitre وجورج غاموف أن يفرضوا بأن الكون كان في البدء مثل تكتل مادي فائق الكثافة، وأنه انفجر لسبب غير معروف ناثراً عبر الكون كل المواد الأولية التي أصبحت مجرات ونجوماً.

لم يكن في حياة هبل الأولى، على الرغم من تأثيره الكبير في الفلك الحديث، ما يشير إلى أنه سيختار الفلك مهنة له، فقد ولد في ولاية كنتوكي Kentucky لأب يعمل في بيع شهادات التأمين، وقد انتقلت الأسرة أخيراً إلى شيكاغو حيث انتسب إدوين إلى مدرسة ثانوية وفاز هناك، لكونه طالباً مبرزاً ورافع أثقال ممتاز، بمنحة دراسية إلى جامعة شيكاغو وفيها اطلع على الفلك مع روبرت ميليكان R.Millikan والفلكي ج. هيل G.Hale[8]، ولا جدال بأن هبْل قد تأثر بهذين الرجلين لأنه تفوق في الرياضيات والفلك، هذا بالإضافة إلى أنه كان ملاكماً وأنه كان في هذا الميدان يعِد بمستقبل احترافي زاهر. حتى لقد حاول أحد المتعهدين تنظيم قتال بينه وبين بطل الوزن الثقيل ج. جونسون[8] (بطل العالم بعدئذ) إلا أن جميع الخطط التي كان يمكـن أن يسير عليها هبـل ليتابـع امتهان الملاكمة انقطعت عندما فاز بمنحة رودس في عام 1910 للدراسة في كلية الملكة في أكسفورد.

وعلى الرغم من خلفية هبل الأكاديمية العلمية فقد فضل في أكسفورد دراسة القانون، إذ إنه



إدوين باول هبل (1889 - 1953)

كان مهتماً بتطوير النظام التشريعي الأنكلو أمريكي مما دفعه إلى أخذ مهنة التشريع مأخذ الجد عند عودته إلى الولايات المتحدة عام 1913 وبعد أن قبل في مهنة المحاماة وافتتح مكتباً في كنتوكي، اكتشف بسرعة بأن هناك فارقاً كبيراً بين الدراسة الأكاديمية للقانون وصعوبات متابعة الشؤون القانونية والتعامل مع الزبائن؛ فهو لم يكن في الحقيقة، يهتم كثيراً بتطبيقات القانون العملية لذلك قرر بأن مهنة المحاماة لم تخلق له وعاد إلى الفلك مجالِه الأصلي.

وفي عام 1914 عاد هبْل كطالب مجاز إلى مرصد يركس Yerkes في شيكاغو وبحث هناك تصنيف السدم [9]، فأُعجب جورج هيل بعمله ودعاه لأن ينضم إليه في مرصد جبل ولسون حيث كان المقراب العاكس ذو المئة بوصة* قيد البناء؛ وما أن اطلع هبْل على الاكتشافات العديدة القيِّمة، التي يتوقع الحصول عليها عندما يصبح المقراب الجديد جاهزاً للعمل، حتى قَبل العرض، إلا أن الولايات المتحدة دخلت الحرب العالمية الأولى، قبل أن يتمكن من بدء عمله الفلكي، وبدأت بتجنيد ما أصبح في فرنسا جيشاً مؤلفاً من مليونيْ جندي، وظل هبْل فيما وراء البحار مدة عامين قبل أن يعود إلى الولايات المتحدة عام 1919 والتحق عندئذ بصديقه هيل في مرصد جبل ولسون.

---

* قطر فتحة مرآة المقراب نحو 250 سنتمتراً.

وكانت أبحاثه الأولى عن تكوين المجرات بوساطة مقراب الستين بوصة في جبل ولسون قد حفزته إلى طرح نظام تصنيفي يميز السدم المجرّية من غير المجرية [9]. «فاكتشف العديد من السدم الكوكبية الجديدة والنجوم المتغيرة، ولكن أهم نتيجة لأبحاثه المبكرة هي المتعلقة بأصل الإشعاع الآتي من السدم المجرّية المنتشرة»[9]، ولكن ما إن أصبح مقراب المئة بوصة جاهزاً حتى بدأ هبْل بإجراء بحث مركز مجهد لتحديد طبيعة السدم الواقعة خارج درب التبانة وتركيبها. وكان اكتشافه الأول لنجم متغير من النوع القيفاوي (السيفيد Cepheid)، في السديم M31 (في تصنيف ميسييه Messier)، مفيداً جداً لجهوده التالية في رسم خريطة الكون المرئي إذ يمكن استخدام هذا النجم المتغير في تعيين أبعاد السدم الخارجية عن الأرض. وقد قدر هبْل فعلاً، بعد دراسة الصور الفوتوغرافية لعدد من النجوم القيفاوية المتغيرة، أن السديم M31 يقع على بعد يقرب من مليون سنة ضوئية خارج مجرة درب التبانة وأنه بالتالي «جزيرة كونية» منعزلة. وهكذا أثبت الإعلانُ الرسمي عن اكتشاف هبْلٍ عام 1924 (الصورة) الجديدة للكون، وهي أنه مؤلف من مجموعة من مئات الملايين من هذه «الجزر الكونية» وكان النقاش الحاد قد قسم الفلكيين،فبعضهم كان يجادل لصالح كونٍ فيه العديد من «الجزر الكونية» والآخرون يؤكدون أن درب التبانة هو المجموعة النجمية الوحيدة في الفضاء التي لها شأن؛ غير أنه بتطوير الأدوات الجديدة كالمقراب العاكس ذي المئة بوصة في جبل ولسون تبين بوضوح أن وجهة نظر الفئة الأولى هي الصحيحة.

وفي عام 1925 كشف هبْل النقاب عن مخططه في تصنيف المجرات فظل هذا التصنيف الدليلَ المعياري للتكوينات المجرية. وقد بينت أبحاث هبْل أن لمعظم المجرات درجة من التناظر الدوراني، ولذلك قسّم جميع المجرات إلى صنفين: المنتظمة وغير المنتظمة؛ وفيما بعد قسم الصنف الأول إلى فئة الحلزونية وفئة الاهليلجية. وهكذا أفاد مخطط تصنيف هبْل في إيجاد نظام ذي شأن في ذلك التشوش الذي أحبط الجهود السابقة التي بذلت لفهم بنية المجرات.

وبعد أن أثبت هبْل أن المجرة هي واحدة الكون الأساسية وقدم «قائمة» مقبولة عالمياً بأنواع المجرات، راح يبحث عن منهج موثوق لحساب الأبعاد حتى طرف الكون المرصود؛ فعاد في البدء إلى نجومه القيفاوية المتغيرة الموثوقة التي مكّنته من توسيع دائرة مسافات المجرات الخارجية إلى مسافة تبلغ نحو 6 ملايين سنة ضوئية فقط [10]؛ ولكنه اعتمد في السنوات القليلة التالية على شدة ضياء العناقيد المجرية لكي يقيس المسافات ووسع الكون المرصود توسيعاً كبيراً إلى مسافة تقرب من ربع مليار سنة ضوئية [10].

وقد هيأت بحوث هبْل هذه في أبعاد المجرات الفرصة لأعظم إنجازاته ونعني به قانون تناسب المسافات بين المجرات مع سرعتها في اتجاه هذه المسافات، إذ بيَّن عمله السابق أنه كلما بعدت المجراتُ عن درب التبانة ازدادت سرعة ابتعادها عنا. وقد قدر هبْل أن «السرع تزداد بمعدل يقرب

من 16 كيلو متر في الثانية لكل مسافة مليون سنة ضوئية » [11] ثم كشفت أبحاث تالية أن هذه العلاقة بدت صحيحة حتى مسافة تقرب من 100 مليون سنة ضوئية [11] ولكن الأهم من ذلك كله هو أن اكتشاف هذه الحقيقة، ونعني بها أن المجرات تتحرك مبتعدة إحداها عن الأخرى بسرع متزايدة باستمرار، يفوق كل اكتشاف فلكي أتى بعد طرح كوبرنيق لنظريته بأن الأرض تدور حول الشمس، لأن ثابت هبل يثبت أن الكون كيان ديناميكي وليس مجموعة ساكنة من النجوم كما تصور معظم العلماء من غاليليو حتى أينشتاين. كذلك أدى هذا الاكتشاف إلى ثابت هبل الفلكي الذي هو نسبة سرعة ابتعاد المجرة إلى بعدها عنا، أما أبعاده فهي مقلوب الزمن ــ فمقلوب ثابت هبْل هو عمر الكون وهو يقرب بحسب تقدير هبْل الأولي، من ملياري سنة [11] (وأصبحَ 15 ملياراً بعد إعادة النظر). ولقد أوحت إلينا أبحاث هبْل المفصلة عن المجرات الخارجية بأنها موزعة نسبياً بانتظام، غير أن الدراسات الأكثر تفصيلاً عن توزع عناقيد المجرات البعيدة جداً، أثبتت أن هذه العناقيد ليست موزعة بانتظام في الفضاء بل إنها على صورة نموذج مخرَّم (أو شبكي) على سطح فقاعات هائلة الحجم مؤلفة مما يبدو أنه فضاءات فارغة.

وقد تفرغ هبْل في الثلاثينات للعمل في رسم خريطة لتوزيع المجرات في كوننا المرصود وبحث ديناميكية دوران المجرات الحلزونية الأذرع، كما انهمك في جدل محتدم مع عددٍ من علماء الكونيات النظريين بشأن التفسير المناسب لانزياح طيف الضوء، الوارد من المجرات الهاربة، نحو الأحمر؛ إذ إن هبْل كان يشعر بأن قياسات هذا الانزياح لم تكن جديرة بالثقة بسبب الإحكام الذي يجب القيام به لمعادلة نقصان طاقة الضوء الوارد من المجرات المرصودة، فهذا النقصان يجعل الضوء يبدو أكثر وهنا مما يمكن أن يكون، وهكذا رفض هبْل أن يُفسَّر انزياح طيف الضوء نحو الأحمر بأنه يدل على ابتعاد المجرات عنا بسرع أقل من سرعة الضوء، وقد أدى به هذا الرفض في عام 1936 إلى استنتاج أن المجرات في حقيقة الأمر ساكنة [12] وعندئذ هوجم هذا الاستنتاج من نظريين عديدين مع أن أعمال هبْل الرصدية لم تلق اعتراضاً [12]. ومهما يكن من أمر فإن استنتاج هبْل هذا يمثل إحدى المرات القليلة التي استهان فيها هبْل بأرصاده الخاصة، لا لشيء إلا لأن النظرية التي تؤيد أرصاده لم يكن يقبلها أو يسلم بها.

وعند اندلاع الحرب العالمية الثانية ترك هبْل الفلك ليصبح رئيساً لقسم القذائف ومديراً للنفق الهوائي فوق الصوتي في منطقة الاختبارات في أبردين حيث ظل حتى عام 1946 [12]، وحينئذ ترك خدمة الحكومة وعاد إلى كليفورنيا ليساعد في الإشراف على صنع مقراب هيل العاكس ذي المئتي بوصة الذي صُمِّم لصالح مرصد بالومار. وعندما أصبح هذا المقراب جاهزاً في عام 1949 كان هبْل أول فلكي يستعمله، وقد وسع مقراب هيل حجم الكون المشاهد ألف مرة ودعم من جديد الأدلة المؤثرة السابقة لصالح وجهة نظر هبْل الأصلية عن الكون المتوسع المتناحي **isotropic**. وعلى الرغم من أن تخوم الكون قد امتدت بعيداً، عندما أكد ولْتر باياد **Walter Baiade** بأن أبعاد المجرات

الخارجية سبق أن قدرت بأقل من حقيقتها بمرتين (من ذلك مثلاً أن النجم المتغير القيفاوي الذي استخدمه هبْل في سديم M 31 كان يبعد عملياً مليونيْ سنة ضوئية)، فقد ظل الشيء الأساسي في مكتشفات هبْل على حاله [12]. ثم أمضى هبْل السنوات القليلة الباقية من حياته يتابع رصد تكوين المجرات ويتمتع بصيد سمك التروتْ وبآيات التكريم التي أضْفيت عليه، من ذلك مثلاً انتخابه عضو شرف في الكلية الملكية في أكسفورد والعديد أيضاً من مراتب الشرف.

وحين اضطلع فلكيو الأرصاد في العقود الثلاثة الأول من هذا القرن بتفسير البيانات التي قدمها انزياح دوبلر في الضوء الوارد من المجرات البعيدة، بأنها دليل على توسع الكون، كان علماء الكونيات منكبين على نظرية أينشتاين في الثقالة (نظرية النسبية العامة) بوصفها الطريق إلى فهم الأرصاد والمرشد إلى تطوير نموذج صحيح للكون، لأن نظرية نيوتن كانت تؤدي إلى خاتمة خامدة ميتة. وكان أينشتاين نفسه قد بدأ هذا العمل في بحثه الشهير عن الكونيات عام 1917 الذي طبق فيه معادلات الحقل الثقالي على الكون بمجمله، علماً بأن هذه المعادلات تعامل الثقالة بأنها انحناء للزمكان أحدثته الكتلة والطاقة في جوارهما. وقد تصور أينشتاين لتطبيق معادلاته أن الكتل الفردية في الكون مفروشة على صورة ضباب متخلخل جداً متجانس Homogenous ومتناح ويملأ الفضاء كله، فكل نقطة من الكون يجب أن تتميز عندئذ بكثافة مادية في تلك النقطة (وهي نفسها في جميع النقاط) وتتميز كذلك بانحناء الزمكان (الذي هو نفسه في كل نقطة)، وكان أينشتاين يبحث لمعادلاته الخاصة بحقل هذا الكون عن حل يكون موافقاً لنموذج كون سكوني متجانس ومتناح وذلك ليتفق مع المبدأ الكوني الشهير الذي ينص على أن الكون يجب أن يبدو هو هو للراصد أينما كان موقعه في الكون. والسبب في ذلك أنه عندما قام أينشتاين ببحثه الكوني الأول لم يكن هروب المجرات البعيدة معروفاً، ولذلك لم يكن لديه ما يجعله يعتقد بأن الكون ليس ساكناً. ولكن لا يمكن الاحتفاظ بكون ساكن، لأنه يتطلب بقاء المجرات منفصلة إحداها عن الأخرى ومعلقة في الفضاء على الرغم من أن قوى الثقالة (انحناء الزمكان) يمكن أن تسعى لأن تجمعها كلها معاً، لذلك أجرى أينشتاين بعض التعديلات في معادلاته بأن أضاف حداً آخر اسماه «الثابت الكوني» لكي يحفظ به الكون من الارتصاص، وهكذا حصل بهذا الحد الإضافي على حل سكوني لمعادلاته يتفق مع كون كروي مغلق نصف قطره محدود.

وهنا علينا أن نعرِّف «نصف قطر الكون» تعريفاً دقيقاً، إذ لا بد من تصور الكون بشكل سطح فضائي ثلاثي الأبعاد (أي سطح فوقي Hypersurface) محتوى في فضاء يفوقه بعدد أبعاده، ويمكن أن نتصور أن أحد هذه الأبعاد هو الزمن. ولكن الأبعاد الوحيدة الحقيقية هي الأبعاد السطحية الثلاثة للسطح فوق الكروي Hypersphere (أي لفضائنا الثلاثي الأبعاد) الذي يمكن أن نقارنه بسطح نفاخة Balloon. أما المجرات وعناقيد المجرات فيجب تصورها كأشياء فيزيائية ملصوقة

على هذا السطح ، والبعد الحقيقي بين أي اثنين منها يقاس على طول السطح الذي نسميه (المسافة على طول خط النظر) في فضائنا الواقعي عمقاً . وهكذا فإن نصف قطر هذه النفاخة ، ولنسمه R ، ليس كمية فيزيائية يمكن قياسها مباشرة بل هي مجرد مقياس وسيط يعين المسافة بين النقاط على سطح النفاخة . وإذا تضاعف R تضاعفت كل المسافات . وليس كون أينشتاين السكوني سوى هذا «الفضاء ــ النفاخة» ونصف قطره هو مقياسٌ وسيط يمتد على طول اتجاه تخيلي في اتجاه «متعامد» مع الفضاء نفسه ، وهو لذلك لا يقاس ؛ وبهذا التصور يجب أن نفهم التوسع على النحو الآتي : إن المجرات لا تبتعد عن أي نقطة مركزية في الفضاء إذ لا وجود لمثل هذه النقطة ، وكل المجرات مفصيولة إحداها عن الأخرى بصورة تجعل التوسع يبدو هو نفسه من كل نقطة في الفضاء ، وهذا يعني أن حجم الكون يزداد كلما استمر التوسع ، أي تماماً مثلما يتوسع سطح النفاخة عندما ننفخ فيها .

ولقد أثبت عدد من علماء الكون ، ولا سيما الرياضي الروسي أ . فريدمان A.Friedmann ، أن نموذج الكون السكوني الذي ألح عليه أينشتاين لم يكن الحل الوحيد الذي يمكن الحصول عليه من معادلات الحقل الكونية التي وضعها أينشتاين ، إذ أعاد فريدمان صياغة هذه المعادلات في قالب يتوقف فيه وسيطا الكون الأساسيان ، نصف قطره R ومتوسط كثافة الكتلة فيه ، على الزمن ، ولذلك أصبحت هذه المعادلات الكونية تؤدي ، بعد ارتباطها بالزمن ، إلى كون متغير (أي كون يتوسع أو يتقلص) بدلاً من أن يظل ساكناً . أما في نموذج أينشتاين السكوني فلا يتغير نصف القطر R ، ولذلك كانت الأبعاد بين المجرات تظل ثابتة في حين يتغير R في نماذج فريدمان ، ولذلك تتغير معه المسافات بين المجرات ومتوسط الكثافة في الكون ، الأمر الذي يعيدنا ثانية إلى اكتشاف هبْل لهروب المجرات النائية ، لكونه نتيجة مباشرة لقانون أينشتاين في الثقالة كما تضمنته صيغ فريدمان المتعلقة بالزمن لمعادلات أينشتاين الكونية . بيد أن هذه المعادلات لا تقتصر على كون متوسع بل تسمح أيضاً بكون يتقلص وهي تنبئنا بالإضافة إلى ذلك عن نوع هندسة الكون هل هي إقليدية (كون منبسط) أم لا إقليدية (أي كون منحنٍ في اتجاه الداخل شبيه بالكرة ومن ثم فهو مغلق ، أو منحنٍ إلى الخارج شبيه بصحن عملاق ومن ثم هو مفتوح) ، إذ تربط المعادلات ذلك الأمر بمعدل توسع الكون (بثابت هبْل) ومتوسط كثافة المادة فيه .

ولكي نشرح ذلك كله دعونا نتأمل بمزيد من العناية المعادلتين الكونيتين المرتبطتين بالزمن ، فالأولى منهما ليست سوى تعبير عن انحفاظ الطاقة من الكون كله ، أي تربط طاقة الكون الحركية الكلية التي تُعطى بمربع معدل تزايد R (أو مبدأ سرعة توسع الكون) بطاقة الكتلة والطاقة الكامنة الثقالية والطاقة الإشعاعية للكون . وهكذا فإن الكون لن يكون مغلقاً ذا هندسة لا إقليدية مثل هندسة الكرة (أو الهندسة الاهليلجية) إلا إذا كانت طاقته الكلية سالبة ، أي يجب أن تكون طاقته الحركية التي هي موجبة ، صغيرة بما يكفي لأن تظل سرعة هروب المجرات البعيدة أدنى من سرعة

الإفلات من الكون عندما يتوسع. ويعني قولنا هذا أن متوسط كثافة كتلة الكون يجب أن يظل أكبر من قيمة معينة حرجة (تسمى الكثافة الحرجة) وُجد أنها تتناسب مع مربع ثابت هبْل (أي مربع معدل تزايد R) مقسوماً على ثابت الثقالة الكوني. وهكذا فإن هذه القيمة العددية الحرجة تتوقف على ثابت هبْل، أي على المعدل الحالي لتوسع الكون، لذلك إذا قبلنا بأن القيمة 16 كيلو متراً في الثانية لكل مليون سنة ضوئية هي قيمة هذا الثابت المهم جداً فإننا نجد أن الكتلة الحجمية الحرجة هي $4,5 \times 10^{-30}$ غرام /سم ^{3} أي 2,7 جزءاً من مليون جزء من النكليون في كل سم ^{3} من الفضاء، أي نكليون واحد في كل (400 000) سم ^{3} من الفضاء. فإذا أهملنا الكتلة الخفية في الكون (أو ما يسمى الكتلة المفقودة) واقتصرنا على المادة المرصودة وحدها (أي النجوم والمجرات والمواد الأخرى) ثم حسبنا متوسط كثافة المادة في الكون فإننا نجد قيمتها أقل من الكثافة الحرجة، مما يشير إلى كون مفتوح، أي كون زائدي سيظل يتوسع إلى الأبد. غير أن الدليل غير المباشر على أن معظم الكتلة في الكون لم يكتشف في الوقت الراهن هو دليل مقنع، لذلك يجب أن نرجئ قرارنا الآن بشأن هندسة الكون، وإذا تبين أن كل ما قُدّر من المادة الخفية موجود فعلاً، فإن كتلة الكون تتجاوز عندئذ الكثافة الحرجة ويكون الكون مغلقاً وعلى صورة زمكان إهليلجي متعدد الأبعاد (وهندسته ريمانية لا إقليدية)، ومن ثم يتباطأ توسعه مع الزمن ثم يتلو ذلك ارتصاص الكون على نفسه. فشرط كهذا يشير إذاً إلى كون يتذبذب وتتناوبه الانكماشات والتوسعات.

لننظر الآن في معادلة أينشتاين الكونية الثانية المرتبطة بالزمن فهي التي يُفترض مبدئياً أننا نستطيع أن نستنتج منها طبيعة هندسة الكون من دون استخدام كثافة كتلته. إذ تربط هذه المعادلة معدل تباطؤ التوسع (أي وسيط التباطؤ) بمربع ثابت هبْل ومربع نصف قطر الكون R. إن هذا الوسيط هو مجرد عدد (أي ليس له أبعاد مكانية ـــ زمانية)، فإذا كانت قيمته أكبر من $\frac{1}{2}$ كان الكون إهليلجياً مغلقاً، وإذا كانت قيمته تساوي $\frac{1}{2}$ كان الكون منبسطاً ولا نهائياً، وإذا كانت قيمته أقل من $\frac{1}{2}$ كان الكون مفتوحاً وزائدياً. فيجب أن نستطيع مبدئياً حساب هذا الوسيط من مقارنة معدل توسع الكون الحالي، (انزياح الضوء الوارد من المجرات القريبة نحو الأحمر ـــ أي المجرات التي تبعد عنا مسافة مئة مليون سنة ضوئية مع معدل توسع الكون منذ مليارات السنين (وذلك من انحراف الضوء الوارد من المجرات البعيدة نحو الأحمر ـــ أي من تلك التي تبعد عنا مسافة مليارات السنين الضوئية). ولكن هذا الحساب صعب جداً بسبب ارتيابنا العظيم جداً بشأن أبعاد المجرات النائية فالأحرى بنا، في الوقت الراهن، أن نترك مسألة هندسة الكون مفتوحة.

لنختتم الآن هذا الفصل بدراسة البدايات الأولى للكون وللشروط التي وجدت في اللحظة التي ولد فيها ـــ أو في اللحظة القريبة جداً من تلك التي ولد فيها، هذا إذا كنا نستطيع الحديث

عن تلك اللحظة أصلاً ، فحتى عهد قريب كان هذا المجال من العلم مقصوراً على فئة قليلة من علماء الكون النظريين ، إذ معظم الفيزيائيين كانوا ينصرفون عنه بملء إرادتهم لأنهم كانوا يشعرون بأن الأدلة الرصدية كانت تؤلف أساساً هشاً أضعف من أن يبنى عليه نموذج مقبول للكون ؛ ولكن التطور السريع الذي تم حديثاً في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة جعل الفيزيائيين يرون أن البدايات الأولى للكون هي مختبرٌ تفوق الطاقات التي كانت موجودة فيه (بمراتب عديدة) كل الطاقات التي يمكن إنتاجها في حدود مختبراتنا الأرضية ، لذلك أصبح فيزيائيو الجسيمات يهتمون اهتماماً كبيراً بالنماذج الكونية لكي يروا فيما إذا كان من الممكن أن تكشف نماذج كهذه بعض السمات الهامة لهذه اللبنات الأساسية التي تُبنى منها المادة كالكواركات مثلاً .

ترى ما هي الظروف التي وجد فيها الكون بعد وقت قصير من ولادته التي نعرفها باسم « الانفجار الأعظم Big Bang » أو « الكرة النارية » البدئية ؟ لكي نكتشف هذه الظروف البدئية التي كان فيها كوننا نعود ثانية إلى معادلات أينشتاين الكونية المتعلقة بالزمن ولكننا سنطبقها على الماضي (لا على المستقبل) بأن نقلب اتجاه مجرى الزمن ـــ أي أننا نبدل في المعادلات t (الزمن) بـ t- (أي بالزمن السالب الذي يجري من المستقبل إلى الماضي) ، وعندئذ تنبئنا هذه المعادلات أننا كلما عدنا القهقري في الزمن يصغر الكون وتتزايد الكتلة وكثافة الطاقة ودرجة الحرارة ويتزايد ثابت هبْل (معدل توسع الكون) . ونستطيع أن نحصل على صورة جيدة عن مجمل الظروف التي وجد فيها الكون في بدايته بتطبيق مبادئ الترموديناميك العامة على الكون المتقلص ، مع التذكر دائماً بأن هذا التقلص يجب أن يكون كظوماً Adiabatic ، إذ لا وجود لطاقة يمكن أن تُكتسب أو أن تُفقد ، وينبئنا الترموديناميك أن درجة حرارة الغاز ، ومن ثم طاقته الداخلية ، تزداد إذا ضغط ضغطاً كظوماً بقوة خارجية ، إذ تنتج زيادة الطاقة الداخلية في الغاز من العمل الذي تبذله القوة الخارجية على الغاز . فهذه الظاهرة تنطبق أيضاً على الكون باستثناء استبدال الثقالة بالقوة الخارجية ، فحين يرتص الكون بتأثير الثقالة تتحول الطاقة الكامنة الثقالية إلى طاقة داخلية (أي إلى طاقة حركية تكتسبها مادة الكون وإلى طاقة إشعاعية) .

إذاً كلما عدنا في الزمن إلى الوراء تناقص نصف قطر الكون وازدادت درجة حرارته بنسبة تناقص نصف قطره بمعنى أنه إذا نقص نصف قطر الكون إلى عُشر قيمته الحالية فإن درجة حرارته تزداد إلى عشرة أمثالها وهكذا دواليك ، كما تزداد أيضاً كثافة المادة والإشعاع ولكن ليس بالنسبة نفسها فالكثافة تزداد بنسبة تزايد مكعب مقلوب نصف القطر (أي تتناسب مع $\frac{1}{R^3}$) ، ولكن كثافة الإشعاع تتزايد بنسبة تزايد القوة الرابعة لمقلوب نصف القطر (أي تتناسب مع $\frac{1}{R^4}$) والسبب في ذلك هو أنه كلما صغر نصف قطر الكون حُشر مزيد ومزيد من الفوتونات في السنتمتر المكعب (أي تتزايد كثافة المادة) ؛ بل إن ما يحدث عند تناقص حجم الكون ليس فحسب حشر مزيد ومزيد

من الفوتونات في السنتمتر المكعب، وإنما تزداد أيضاً طاقة الفوتون (إذ يميل لون الضوء إلى الأزرق). وهكذا نرى أنه كلما عدنا بالزمن إلى الوراء أصبح الإشعاع أكثر أهمية من المادة فيما مضى من تاريخ الكون. وليس هذا لأن طاقة الفوتونات نفسها كانت أكبر بل لأن عدد الفوتونات أيضاً كان أكبر من النكليونات بمعامل يقرب من 10 مليار.

وإذا واصلنا رحلتنا في اتجاه الزمن الماضي فإننا نرى أن تنظيم الكون الحالي يتحول إلى فوضى متزايدة كلما ارتفعت درجة الحرارة، فالنجوم والكواكب والمجرات تتفتت كل منها على حدة إلى ذراتها المكونة لها بالإشعاع الحار جداً المحيط بها ثم تتفتت هذه الذرات في الوقت المناسب كلاً على حدة إلى إلكترونات ونوى، وأخيراً تتفكك النوى نفسها إلى نكليونات. ذلك هو حال الكون عندما كانت درجة حرارته تقرب من تريليون (ألف مليار) درجة كلفن وكان نصف قطره نحو جزء من تريليون من نصف قطره الحالي. ولكن فيزيائيي الجسيمات نظروا في الحالات التي تبلغ فيها الحرارة درجة أعلى وفي زمن أبكر، أي أنهم نظروا في زمن أبعد في الماضي السحيق ورأوا أنه حين نعود إلى هذه الأحقاب الأولى أي إلى ما يقارب جزءاً من تريليون تريليون تريليون من الثانية بعد لحظة البدء (أي بعد أن كان نصف قطر الكون صفراً) فإن المعادلات الكونية تنبئنا عندئذ أن درجة حرارة الكون وكثافته تظلان في تزايد مستمر إلى أن تصبحا في آخر الأمر (حال اقترابنا من اللحظة صفر)، لا نهائيتين، وعندئذ نصل إلى الحالة التي تسمى «المتفرد البدئي»، وهي حالة ليس لها معنى فيزيائي محدد وذلك بسبب بطلان المعادلات آنئذ؛ لذلك لا يمكن للنظرية بوضعها الراهن أن تفهمنا «ولادة الكون»، وهذا ما دعا علماء الكون إلى أن يبدؤوا دراساتهم عندما كان عمر الكون 10^{-35} ثانية وكانت درجة حرارته من مرتبة عشرة آلاف تريليون تريليون درجة كلفن، وهذه اللحظة نستطيع أن نعدها لحظة «الانفجار الأعظم» لأن الكون فيها كان حاراً جداً وكان «كرة نارية» وأصغر من حجمه الحالي بنسبة 1 إلى 10^{28}.

وكان الكون الطافح آنذاك بالإشعاع مليئاً بخليط من الإشعاع الحار المؤلف من الباريونات والباريونات المضادة ومن كل الأنواع وكذلك بكل نوعية من نوعيات الميزونات واللبتونات واللبتونات المضادة. ثم حين توسع الكون وبرد، اختفت سائر الباريونات ما عدا النكليونات، واختفت سائر اللبتونات ما عدا الإلكترونات، وكانت درجة حرارة الكون آنذاك من مرتبة مليار درجة كلفن، وهذه برودة كافية لأن تتكون نوى الهليوم من النكليونات، إذ اندمج بالفعل 25% من البروتونات في تكوين نوى الهليوم. ولما كان الكون في توسع مستمر، لذلك تابعت درجة الحرارة هبوطها إلى أن أصبحت برودة الكون كافية لتكوين ذرات الهدروجين والهليوم الحيادية. ولم تتوقف درجة الحرارة عن الهبوط لذلك أتى وقت أصبح فيه الإشعاع أبرد من أن يتفاعل مع ذرات الهدروجين والهليوم الحيادية، فاستقرت المادة والإشعاع على هذا الوضع المنفصل، وأصبحت المادة (الثقالية) هي السائدة في

الحالة الحاضرة من الكون المتطور .

ذلك هو وصف النظرية المعتمدة التي ، كما يتبين بوضوح ، لا ترضي لأنها لا تستطيع بوضعها هذا أن تلغي المتفرد البدئي الذي لا تسمح به الفيزياء . ولكن أحد الباحثين (وهو موتْز Motz) بيّن أنه يمكن الخروج من هذا المأزق فيما لو قبلنا بإجراء تعديل كبير على تصورنا لبنية النكليون ، إذ استنتج وجود جسيمات ثقيلة جداً وأساسية سماها « أونيتونات » وطابق بينها وبين كواركات غيلمان ، فأصبحت القوة التي تربط الكواركات هي القوة الثقالية لأن كتل هذه « الأونيتونات » كبيرة (تبلغ كتلة الواحدة منها 10^{-5} غرام) . وتصوّر النكلونات نفسها في صورة دوارات خطية ومعها ثلاث « أونيتونات Unitons » مرصوفة في رتل : اثنان على الطرفين وواحد في الوسط ، وعندئذ فُسّر « الانفجار الأعظم » بأن الكون كان مكوناً في البداية من أونيتونات لا غير ، وأن هذه قد اتحدت في ثلاثيات لكي تكوّن نكليونات مع التخلي عن طاقة هائلة جداً ، وكان ذلك هو « الانفجار الأعظم » الذي هو ولادة الكون .

وهكذا يتخلص نموذج هذه النكليونات من المتفرد البدئي في هذا الكون ، وذلك بأن يُهمل نهائياً لحظة البدء ؛ إذ إن نموذج الأونيتونات لا يحتاج إلى لحظة لبدء التكوين (الخلق) ؛ فإذا عدنا القهقرى في الزمان مرة ثانية إلى الحين الذي كانت فيه درجة الحرارة 10^{32} كلفن كانت الفوتونات في ذلك الحين نشيطة وكان نشاطها كافياً لأن يفكك النكليونات إلى أونيتونات ولذلك أزيل الإشعاع آنذاك من الكون نتيجة امتصاصه وأصبح الكون بارداً وأصبحت طاقته كلها عندئذ في صورة كتل أونيتونية ومعها طاقاتها المتبادلة الثقالية ؛ فلم يكن أمام الكون في هذه الحالة لأن يتغير إلا بارتصاص الأونيتونات في صورة ثلاثيات نكليونية ، وهكذا تكرر حدوث هذه الظاهرة في الماضي وسيظل يتكرر أيضاً في المستقبل .



خـاتمـة

لقد ضمّنا عرضنا لتطور الفيزياء وازدهارها أمرين: أحدهما حياة العلماء الذين اكتشفوا وطوروا المبادئ التي قامت عليها الفيزياء الأساسية والثاني طريقة اكتشاف هذه المبادئ وافتراضها. ولا بد للمرءَ أن يعجب عند دراسته حياة هؤلاء المكتشفين كيف يتفانون في سبيل دوافعهم الداخلية التي لا تخمد وحاجتهم لسبر الطبيعة واكتشاف ما يتحكم فيها، بل سيزداد عجبه حين يعلم أنه لم يكن ثمة قواعد في البدايات الأولى للفيزياء يستنير بها الفيزيائيون، لذلك كانوا كالمستكشفين الضالين في عالم مجهول ليس فيه دليل، ولم يكن عليهم اكتشاف الطريقة التي «تعمل» بها الطبيعة فحسب بل كان عليهم أيضاً اكتشاف منطق جديد وتطويره، ونعني به منطق علمهم الخاص الذي كانت طبيعته الأصيلة غير واضحة المعالم، لذلك كانت مهمتهم تتطلب حداً أدنى من الإيمان والكبرياء، الإيمان بأن الطبيعة (أو الكون) عقلانية (ليست مزاجية)، والكبرياء لكي يثقوا بأن قدراتهم العقلية في مستوى المهام التي يواجهونها عند حل المشاكل التي تطرحها عليهم الطبيعة.

وحين قبل الفيزيائيون الأوائل بعقلانية الطبيعة، ومن ثم بإمكانية وصفها استناداً إلى مبادئ أساسية، بدؤوا ثورة فكرية انتشرت إلى أبعد بكثير مما أمكنهم تصوره، فكان تأثيرها بالغاً في كل وجه من أوجه مجتمعنا الحديث. ولقد تطلب السير في هذه الطريق الثورية شجاعة فائقة لأن الظواهر المرصودة التي تشير إلى وجود انتظام في الكون قليلة جداً علماً أن التنظيم الجيد في الكون والعقلانية يتطلبان مثل هذا الانتظام، ولكن ضخامة التنوع في المادة وصورها أوحيا لليونانيين الأوائل بأن الطبيعة لا تتحكم بها قوانين كونية شاملة بل رتل من الآلهة التي توجه الحوادث وفقاً لأمزجتها، حتى إن بعض ظواهر السماء كإشراق كوكبات النجوم الثابتة يومياً ومغيبها، وحركات الكواكب الظاهرية وأوجه (أطوار) القمر وكسوف الشمس التي تحدث بانتظام شديد، كل ذلك لم يُتخذ دليلاً على أنه إجراء يتطلب قوانين طبيعية عامة بل اتخذ دليلاً على قوة الخالق القدير الجبار الذي فرض مشيئته على هذه الأجرام السماوية فألزمها بأن تتحرك وفق خطة منتظمة تناسب الأجرام السماوية.

وكان من أسوأ الهرطقات التي يتطلب إعلانها جرأة كبيرة، الخروج على صورة إيمان بسيطة كهذه والقول بأن الإله أو الآلهة لا تستطيع أن تغير شيئاً من ديناميك المنظومة الشمسية لأن هذه المنظومة تتصرف وفقاً لقوانين لا تقبل التبديل حتى أن الآلهة نفسها تذعن لها. وأكبر دليل على مدى خطورة المجاهرة بمبادئ علمية في ذلك الوقت، هو حرق جيوردانو على السفود (الخازوق) عام 1600 وسجنُ غاليليو. ولكن أن يكون المرء رائداً في العلم يتطلب جرأة لا حد لها تجعله يصر على وجهة نظره حتى ولو لم تكن على وفاق مع وجهات النظر السائدة في زمانها. وقد يكون التسفيه الموجه من أحد الأنداد عند طرح أفكار ومفاهيم غير مألوفة عائقاً قوياً باتجاه كل عرض لأفكار جديدة. فقد اعترف كوبرنيق مثلاً أنه كان غير راغب في نشر نظريته في المنظومة الشمسية القائلة بمركزية الشمس «خوفاً من أنه قد يصبح موضع استهزاء على مسرح التاريخ». وكاد يوليوس ماير أن ينتحر نتيجة الازدراء الذي أصابه من معاصريه في القرن التاسع عشر لأنه قال بأن الحرارة نوع من الطاقة واكتشف بذلك قانون الترموديناميك الأول. ولعل خير من عبَّر ببلاغة عن حاجة المرء للجرأة حين يطرح نظرية جديدة هو أينشتاين حين علم بنموذج ذرة بور الكمومية، إذ صرح آنذاك أن الفكرة نفسها كانت لديه قبل بور بسنة ولكنه لم يملك الجرأة على إعلانها. وهكذا نجد أن الخوض في قصة الفيزياء هو الخوض في قصة شجاعةٍ كانت طبيعةً بارزة لدى كل شخصيات هذه القصة.

حين بدأ العلم الحديث أولى خطواته بأعمال كبلر وغاليليو ونيوتن جاء تطوره من غير أن تكون هناك مسألة أساسية يعتمد عليها، فقد كانت المحاولات كلها تسعى لاكتشاف الوصف الصحيح لظواهر نوعية من دون أن يُبحث عن مبادئ عامة يمكنها أن تفسر في وقت واحد العديد من الظواهر. وكانت أول خطوة لتحقيق هذا الهدف هي التي قام بها نيوتن باكتشافه قانون الثقالة وافتراضه أن قوة الثقالة هي «المحرك الأول» في العالم لكونها لا تتحكم فحسب بكيفية «سقوط التفاحة على الأرض» بل كذلك بكيفية دوران القمر حول الأرض وكيفية دوران الكواكب حول الشمس وكيفية حدوث المد والجزر والطريقة التي تتم بها حركات النجوم نفسها. لذلك كان تعميم مفهوم نيوتن على هذا النحو يفوق في أهميته كل وصف لأنه جدد طريقة النظر إلى الفيزياء كلها ووضع لها هدفاً آخر ألا وهو السعي لاكتشاف مبادئ أو قوانين شاملة، لا لاكتشاف تفسيرات نوعية لحوادث خاصة، وهذا هو السلك الناظم الذي يربط موضوعات الفيزياء معاً منذ عهد نيوتن حتى عهدنا الحاضر، وهو ما زال يتجلى في صور مختلفة وأحدث سجل له هو ما يعرف باسم «نظرية كل شيء».

ولقد نشأ الدافع إلى توحيد الفيزياء من اكتشاف أن البنى الموجودة في الكون كلها مرتبطة بالقوى العاملة فيه، ولكن هذه الفكرة ربما بدت لأول وهلة مؤدية إلى التنوع بدلاً من التوحيد، لأن تنوع البنى كما يبدو لا حصر لعدده حتى ليتراءى لنا من النظرة الأولى كأننا بحاجة إلى عدد لا نهاية

له من القوى لتفسير هذه البُنى كلها . ولكن صعوبة تحقيق التوحيد في الفيزياء عن طريق ربط البنى بقوى هي صعوبة ظاهرية فحسب وليست حقيقية لأن قوة واحدة تكفي لإحداث بنى مختلفة ، لذلك يكفي مبدئياً وجود عدد قليل من القوى لتفسير جميع البنى في العالم .

أما كيف يمكن للقوة أن تحدث بنية فهذا واضح من قوانين نيوتن في الحركة ، فهي التي تربط طريقة تحرك الجسم بالقوى المؤثرة فيه ، فلو لم توجد قوى في العالم لتحركت جميع جسيماته في خطوط مستقيمة ، ولما أمكن لها أن تتحد في مجموعات كما هو شأنها الآن بسبب قوى التجاذب المادي بينها ، ولما أمكن أبداً بالتالي أن تتكون البنى ؛ وهكذا فإن اكتشاف نيوتن ، أن القوة المؤثرة في جسيمٍ هي التي تغيِّر حالته الحركية باستمرار ، هو المفتاح الذي أفضى إلى فهم معنى البنية وإلى البدء بالحملة الناشطة نحو التوحيد في الفيزياء .

وقد يكون مفيداً هنا أن نرى بسرعة كيف ينطبق هذا المفهوم ، باستخدام قوانين نيوتن في الحركة وقانونه في الثقالة ، على بنية المنظومة الشمسية التي تتحكم بها الثقالة ، أي القوة الأولى التي دُرست بالتفصيل . فلو زالت هذه القوة فجأة لابتعدت الكواكب بعضاً عن بعض وعن الشمس ، ولسارت في خطوط مستقيمة ولزالت عن المنظومة الشمسية صفة البنية نهائياً . فمن حسن حظنا إذاً أن يكون جذبُ الشمس الثقالي للكواكب ونزعةُ هذه الكواكب للاحتفاظ بحركة مستقيمة منتظمة (أي عطالتها) تنضمان لإبقائها في حركتها حول الشمس في مدارات قريبة من الدائرية وبذلك تكون المنظومة الشمسية مصونة كبنية ديناميكية .

ولقد قام نيوتن إذاً بتعميم رائع حين طرح فكرة أن الثقالة عامة (شاملة) وأنها تفسر جميع البنى الكبيرة في الكون (كالكواكب والنجوم والتجمعات النجمية) ، حتى لقد ذهب إلى أبعد من ذلك واقترح أن الثقالة هي التي تتحكم ببنية الكون نفسه ، فحاول عندئذ أن يستخدم قانون الثقالة في حساب توزع النجوم الظاهر للعيان ، فكان عمله هذا إيذاناً ببدء علم الكونيات الحديث .

ولم يتوان الفيزيائيون والفلكيون بعد هذا كله عن التسليم بأن الثقالة هي القوة الفلكية والكونية الأولى ، وبدأ كبار الرياضيين في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر ، اعتماداً على هذا الاعتقاد ، بتطوير أروع صرح في الفيزياء النظرية ، ونعني به الميكانيك السماوي الذي يمثل ذروةَ ما بلغته نظرية نيوتن في الثقالة . فقد أدخل هؤلاء الرياضيون مفاهيم جديدة ما زالت تقوم بدورها المهم في الفيزياء وتوجِّه الفيزيائيين في تقويمهم للنظريات الجديدة . فالفيزيائيون يصرون على أن النظرية يجب أن تكون جميلة رياضياً لكي تكون صحيحة ، وهذا يعني أن التعبير الرياضي عن النظرية يجب أن يكون رشيقاً وبسيطاً لا يُدخل إلا أقل ما يمكن من المفاهيم الأساسية ، ولقد ظل مفهوم الجمال هذا سائداً في الفيزياء إلى وقتنا الحاضر .

وعندما تم التعبير عن الفيزياء النيوتنية في القرن التاسع عشر برياضيات رشيقة استُخدمت

لهذه الفيزياء مفاهيم أخرى مكنت الفيزيائيين من تطوير مادتهم من غير عودة إلى نوعية القوى، وكانت أهم هذه المفاهيم مبادئ الانحفاظ التي تنص على أن هناك كيانات فيزيائية يجب أن تبقى كما هي في جميع التفاعلات التي تجري بين الجسيمات مهما كانت طبيعة هذه التفاعلات. ومن بين هذه الكيانات ثلاثة، الاندفاع والطاقة والاندفاع الزاوي (في الحركة الدورانية)، هي ذات أهمية خاصة في منظومة معزولة من الجسيمات (وبالتالي في الكون نفسه بكليته)، وسرعان ما أصبحت مبادئ الانحفاظ هذه عامة شاملة، بمعنى أنها تطبق في كل مكان وفي جميع الأزمان وهي لا تزال على سيادتها في الفيزياء.

وترتبط مبادئ الانحفاظ بمفاهيم أخرى هي مفاهيم التناظر التي قامت بدور مهم جداً في توجيه الفيزيائيين عند بحثهم عن قوانين فيزيائية صحيحة. ويعني التناظر، كما يستخدمه الفيزيائيون، أن الصيغة الرياضية لقانونٍ ما يجب أن تظل على ما هي عليه عندما يعبر عنها مراقبون مختلفون؛ وهذه وجهة نظر تشمل مفهوم الصمود. وهكذا يعني مبدأ انحفاظ الاندفاع أن المكان يجب أن يكون متناظراً، بمعنى أن قوانين الطبيعة يجب ألا تتغير إذا انتقلنا من أحد جوانب الفضاء إلى الجانب الآخر، ويعني مبدأ انحفاظ الطاقة أن القوانين يجب ألا تتغير من لحظة إلى أخرى (أو تناظر الكون الزمني)، ويعني مبدأ انحفاظ الاندفاع الزاوي أن القوانين يجب ألا تتغير كيفما نظرنا إلى الكون وفي أي اتجاه.

غير أن هذه المفاهيم كلها، التي تمثل استمرار الفيزياء من نيوتن حتى وقتنا الراهن، استُمدت من ديناميك نيوتن عندما كانت الثقالة لا تزال هي القوة الوحيدة المفهومة في الفيزياء، ولكن، حتى في ذلك الزمان، كان واضحاً أن الثقالة لا تقوم بأي دورٍ أو تقوم بدور ضئيل جداً في ديناميك المادة الداخلي أو في التفاعل بين الجسيمات كلها المحيطة بنا، هذا على الرغم من أنها هي التي تضبط ديناميك الكواكب والنجوم، ولذلك يبدو من وجهة نظر سطحية أنه لا بد من وجود قوى مختلفة عديدة عاملة لكي يُفسَّر هذا التنوع الواسع في المواد، بدءاً من أقساها وأمتنها كالألماس والفولاذ، حتى أرقها وألينها كالخلايا الحية. والحقيقة أنه لو كان الأمر كذلك لكانت كل محاولة لإيجاد مثل هذه القوى غير مُجدية، ولكن وضعنا، لحسن الحظ، ليس كذلك، لأن الكهرباء التي اكتشفها اليونانيون القدماء، من دون أن يدروا، هي القوة التي تُفسّر كل خواص المادة العادية التي نشاهدها وتفسر كل المتعضيات الحية وسيرورات حياتها.

ولقد انقضى ما يقرب من ألفي عام على اكتشاف القوة الكهربائية قبل أن يبرهن الفيزيائيون على أن هذه القوة هي التي تفسر بنية الذرات والجزيئات وكل ما يتصل بالكيمياء. والحقيقة إن جميع القوى المحيطة بنا في حياتنا اليومية، ما عدا الثقالة، (كقوى الاحتكاك والمرونة والعضلات الخ..) هي تجليات مختلفة للقوة الكهربائية، ولكن لهذه القوة سمة أخرى لم يعرفها اليونانيون الأوائل ولم

تكتشف إلاعرضاً في القرن الثامن عشر، وهي اقترانها بالمغنطيسية؛ فقد اكتشف اليونانيون المغنطيسية ولكنهم لم يعرفوا أن الكهرباء والمغنطيسية مرتبطتان وأنهما وجهان مختلفان لقوة واحدة تدعى القوة الكهرطيسية.

وكان اكتشاف الكهرطيسية بداية مرحلة جديدة في الفيزياء يمكن أن ندعوها «توحيد الفيزياء». وقد استمرت متابعة هذه المرحلة طيلة حياة أينشتاين على صورة بحث عن «نظرية الحقل الموحد»، وكان الهدف الذي يسعى إليه هذا البحث، كما عبر عنه أينشتاين أحسن تعبير، هو إثبات أن الحقل الكهرطيسي والحقل الثقالي يمكن استنتاجهما من حقل واحد هو الحقل الأساسي لكليهما. وكان بحث أينشتاين، على الرغم من إخفاقه، مصدر إيحاء وحافزاً كبيراً لأنه أدى إلى محاولات اليوم لتوحيد القوى الأربع التي يعرفها الفيزيائيون، وهي الثقالة والكهرطيسية والنووية الشديدة والتفاعل الضعيف.

وكانت الجذور الأولى لمفهوم التوحيد، الذي يتغلغل الآن في الفيزياء، متأصل في رياضيات الفيزياء النيوتنية لأن جميع الصيغ الرياضية المستخدمة في معالجة الثقالة النيوتنية هي نفسها يمكن تطبيقها مع شيء من التعديل لمعالجة التفاعلات الكهرطيسية بين الجسيمات المشحونة بالكهرباء؛ وهكذا كان تشابه الصيغة الرياضية في النظريتين (الثقالية النيوتنية والكهرطيسية) سنداً قوياً للسير نحو توحيد الحقلين.

ومع أن هذا التوحيد لم يتحقق، فقد حدث توحيد من نوع آخر في اكتشاف مكسويل الرائع لطبيعة الضوء الكهرطيسية، إذ أظهرت معادلاته الشهيرة، التي تعبر عن الحقل الكهرطيسي، أن هذا الحقل ينتشر في الفضاء الخالي بسرعة الضوء نفسها، ثم أثبتت تجارب الفيزيائي العظيم هنريخ هرتز، قرب نهاية القرن التاسع عشر، أن أمواج مكسويل الكهرطيسية لها كل خواص الأمواج الضوئية، وبذلك أكمل توحيد الكهرطيسية والضوء. وكان لا بد أن يغيّر هذا الإنجاز مبادئ الانحفاظ النيوتنية الأساسية التي نقلت برمتها إلى الكهرطيسية.

ولكن لم يقتصر التوحيد على الكهرطيسية والضوء، فقد أثبت فيزيائيون آخرون أنه إذا سلمنا بالمفهوم الجزيئي فإننا نستطيع استنتاج قوانين الترموديناميك وقوانين الغازات من قوانين نيوتن في الحركة؛ إذ قوانين نيوتن في الحركة تُرجع الضغط في الغاز إلى الصدمات الجزيئية، وتُرجع درجة الغاز إلى قيمة الطاقة الحركية الوسطية للجزيء (أو المعدل الوسطي لطاقة الجزيء)، ولكن التوحيد الذي كان الأكثر إثارة للعجب وكان له أكبر صدى من كل ما عداه هو ذاك الذي أنجزه أينشتاين في عام 1905 في نظريته النسبية الخاصة والذي وحد المكان والزمان في كيان فيزيائي وحيد سمي المكان ــ الزمان (أو الزمكان)، فقد حطم هذا المفهومُ فكرتيْ نيوتن المنفصلتين، المكان المطلق والزمان المطلق ووضع مكانهما زمكاناً وحيداً مطلقاً متعدد الجوانب ورباعي الأبعاد، لا بل لقد

ذهب اكتشاف أينشتاين إلى أبعد من توحيد المكان والزمان الذي انبثق من ثبات سرعة الضوء المؤكد بالنسبة لجميع المراقبين الذين يتحركون بمتجهات سرع ثابتة (لكنها تختلف من مراقب لآخر) في فضاءٍ خال، فقد وحد طاقة الجسيم واندفاعه وكتلته في كيان واحد كتلة ــ طاقة ــ اندفاع. وهكذا حل مبدأ انحفاظ واحد للطاقة والكتلة والاندفاع محل مبادئ الانحفاظ المنفصلة: انحفاظ الطاقة وانحفاظ الاندفاع وانحفاظ الكتلة، ورسخ بذلك مبدأ التكافؤ بين الكتلة والطاقة الذي لا يمكن من دونه فهم فيزياء الجسيمات العالية الطاقة المعاصرة.

والحقيقة إنه يمكن الوصول إلى هذه النتائج الرائعة لنظرية أينشتاين النسبوية الخاصة من مبدأ الصمود الأساسي الذي ينص على أن كل قانون طبيعي يجب أن يظل على صيغته الرياضية نفسها بالنسبة إلى جميع المراجع التي يتحرك إحدها بالنسبة للآخر حركة مستقيمة منتظمة، أو بعبارة أخرى إن التعبير الرياضي عن القانون الذي يحصل عليه مراقب يتحرك حركة مستقيمة منتظمة يجب أن يكون هو نفسه الذي يحصل عليه المراقب الآخر، ولكن هذا المبدأ لا يسري على أي تقرير بشأن الطبيعة ليس له صفة القانون. وهكذا اتضح أن مبدأ الصمود هو أداة تحليلية قوية تمكّن الفيزيائي من التفريق بين القوانين الأساسية الشاملة من جهة، وكل الأقوال المحتملة بشأن الطبيعة من جهة أخرى؛ لا بل لقد كان مبدأ الصمود وسيظل دائماً مرشداً صادقاً للفيزيائي ينير طريقه في بحثه عن الحقائق الشاملة، فهو اليوم أساس الفيزياء المعاصرة كلها.

وقد وحد أينشتاين الفيزياء إلى مدى أبعد في نظريته النسبية العامة حين استبدل بقوة الثقالة انحناء الزمكان المتعدد الجوانب. فالكتلة، وفقاً لهذه النظرية، تحني الزمكان الرباعي الأبعاد المتعدد الجوانب في جوارها فتجعل الجسيم يتحرك على الانحناء الزمكاني بدلاً من أن يتحرك في خط مستقيم وكأن الكتلة الأولى (الجسيم الأول) تشده إليها. وهكذا استبدل أينشتاين الزمكان المنحنى بقوة الثقالة وجعل الهندسة بعمله هذا جزءاً من الفيزياء؛ ثم طبق هذه النظرية على الكون بأكمله، فكان ذلك بداية علم الكونيات الحديث الذي من أهم نتائجه أن الكون يتوسع وأن توسعه هذا بدأ منذ ما يقرب من 15 مليار سنة بانفجار هائل (الانفجار الأعظم). ولقد وفّر دمج الهندسة والفيزياء مجالات واسعة جداً أمام الفيزيائي، فلم يعد يشمل بنية الكون فحسب بل أيضاً بنى الجسيمات التي لا يوجد أبسط منها.

وكان الكون يبدو، عندما شارف القرن التاسع عشر على الانتهاء، مؤلفاً من كيانين متمايزين يؤثر أحدهما في الآخر ولكنهما مختلفان بالنوعية اختلافاً تاماً، وهما الجسيمات والحقول. فالجسيمات (ونعني بها الإلكترونات والبروتونات) مستقرة في المكان وهي تفسر تكوين المادة كلها في الكون؛ في حين أن الحقول ليست مستقرة بل منتشرة كالأمواج، ويمكن تصور أنها طاقة بحتة، غير أن هذا التصور، الذي يميز في محتوى الكون بين نوعين: جسيمات وأمواج، تحطم على يد ماكس

بلانك وألبرت أينشتاين اللذيْن اكتشفا أن الحقل الكهرطيسي يتصرف تصرف سيل من الجسيمات (فوتونات) مثلها مثل قطار من الأمواج، فكان هذا الاكتشاف بداية المثنوية موجة ـــ جسيم التي نفذت اليوم إلى الفيزياء بأكملها. وكانت قد استكملت في القرن العشرين عندما اكتُشف أن الجسيمات (ونعني بها الالكترونات والبروتونات) لها أيضاً خواص موجية، وبذلك انغلقت دائرة الأفكار وبدأ تطور فرع فيزيائي رياضي واحد لمعالجة الجسيمات والحقول معاً سمي الميكانيك الكمومي.

وهنا يجب أن ننهي قصتنا عن الفيزياء، لا لأن الفيزيائيين لم يعد لديهم أشياء يفعلونها، إذ لا يزال عليهم القيام بالمزيد من الاكتشافات المثيرة التي تنتظر التحقيق، ولكن لأن النظريتين اللتين ستهديانهم في أبحاثهم، ونعني بهما نظرية النسبية ونظرية الكم، أصبحتا معروفتين؛ فهاتان النظريتان تقفان اليوم في ذروة إنجازات الإنسانية وإبداعاتها وهما اللتان وحدتا العالمين: عالم الجسيمات المجهري وعالم النجوم والمجرات الجهري (العياني). وحين نستند إلى وحدة الكون، تكون هاتان النظريتان ملء تفكيرنا، لأنهما يعرّفاننا كيف يمكن استنتاج توسع الكون من خواص الجسيمات الأولية التي تؤلف المادة والطاقة معاً في الكون.

Notes

CHAPTER 1

1. Herbert Westren Turnbull, *The Great Mathematicians* in *The World of Mathematics*. James R. Newman, ed. New York: Simon & Schuster, 1956.
2. Will Durant, *The Story of Philosophy*. New York: Simon & Schuster, 1961, p. 41.
3. *Ibid.*, p. 44.
4. G. E. L. Owen, "Aristotle," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 1, 1970, p. 250.
5. Durant, *op. cit.*, p. 44.
6. Owen, *op. cit.*, p. 251.
7. Durant, *op. cit.*, p. 53.

CHAPTER 2

1. William H. Stahl, "Aristarchus of Samos," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 1, 1970, p. 246.
2. *Ibid.*, p. 247.
3. G. J. Toomer, "Ptolemy," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 11, 1975, p. 187.

CHAPTER 3

1. Stephen F. Mason, *A History of the Sciences*. New York: Abelard-Schuman Ltd., 1962, p. 127.
2. Edward Rosen, "Nicolaus Copernicus," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 3, 1971, pp. 401–402.
3. Mason, *op. cit.*, p. 128.
4. Rosen, *op. cit.*, p. 403.

5. David Pingree, "Tycho Brahe," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 2, 1970, p. 401.
6. *Ibid.*, p. 402.
7. *Ibid.*, pp. 402–403.
8. *Ibid.*, p. 413.
9. Owen Gingerich, "Johannes Kepler," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 7, 1970, p. 289.
10. *Ibid.*, p. 290.
11. Mason, *op. cit.*, p. 135.
12. *Ibid.*, p. 136.
13. Gingerich, *op. cit.*, p. 305.

CHAPTER 4

1. W. L. Reese, "Galileo Galilei," *Dictionary of Philosophy and Religion*. Atlantic Highlands, New Jersey: Humanities Press, Inc., 1980, p. 186.
2. Chet Raymo, *The Soul of the Night*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985, p. 163.
3. G. Szczesny, *The Case Against Bertold Brecht: With Arguments Drawn from His Life of Galileo*. New York: Frederick Ungar Publishing Company, 1969, p. 68.
4. Dietrich Schroeer, *Physics and Its Fifth Dimension: Society*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, p. 81.
5. *Ibid.*, p. 84.

CHAPTER 5

1. "Sir Isaac Newton," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 13, 1974, p. 17.
2. Isaac Asimov, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Garden City, New York: Doubleday & Company, Inc., 1982, p. 148.
3. "Sir Isaac Newton," *op. cit.*, p. 17.
4. E. N. da Costa Andrade, "Isaac Newton," *The World of Mathematics*. Ed. James R. Newman. New York: Simon & Schuster, 1956, p. 256.
5. "Sir Isaac Newton," *op. cit.*, p. 17.
6. John Maynard Keynes, "Newton, the Man," *The World of Mathematics*. Ed. James R. Newman. New York: Simon & Schuster, 1956, p. 278.
7. Asimov, *op. cit.*, p. 148.
8. *Ibid.*, p. 232.
9. "Sir Isaac Newton," *op. cit.*, p. 18.
10. Asimov, *op. cit.*, p. 152.
11. *Ibid.*, p. 153.
12. Andrade, *op. cit.*, p. 270.
13. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 89.

CHAPTER 6

1. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 54.
2. *Ibid.*, p. 55.
3. *Ibid.*, p. 38.
4. *Ibid.*, p. 40.
5. *Ibid.*, p. 65.
6. Isaac Asimov, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Garden City, New York: Doubleday & Co., Inc., 1982, p. 155.
7. "James Bradley," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 3, 1974, p. 101.
8. "Edmond Halley," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 8, 1974, p. 556.
9. *Ibid.*, p. 557.

CHAPTER 8

1. "Sir William Rowan Hamilton," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 8, 1974, p. 588.
2. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 1027.
3. "Sir William Rowan Hamilton," *op. cit.*, p. 588.
4. Boorse and Motz, *op. cit.*, p. 1028.
5. "Sir William Rowan Hamilton," *op. cit.*, p. 589.
6. Boorse and Motz, *op. cit.*, p. 1028.
7. "Sir William Rowan Hamilton," *op. cit.*, p. 589.
8. Herbert Westren Turnbull, *The Great Mathematicians* in *The World of Mathematics*. Ed. James R. Newman. New York: Simon & Schuster, 1956, p. 163.
9. Boorse and Motz, *op. cit.*, p. 1029.
10. W. R. Hamilton, *Dublin University Review*, 1833, pp. 795–826.
11. Turnbull, *op. cit.*, p. 153.
12. "Joseph-Louis Comte de Lagrange," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 10, 1974, p. 598.
13. Turnbull, *op. cit.*, p. 154.
14. "Joseph-Louis Comte de Lagrange," *op. cit.*, p. 598.
15. Turnbull, *op. cit.*, p. 155.

CHAPTER 10

1. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 319.
2. *Ibid.*, p. 320.
3. *Ibid.*, p. 321.

4. *Ibid.*, p. 263.
5. *Ibid.*, p. 264.
6. *Ibid.*, p. 265.
7. *Ibid.*, p. 266.
8. *Ibid.*, p. 267.

CHAPTER 11

1. R. Steven Turner, "Julius Robert Mayer," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 9, 1974, p. 237.
2. *Ibid.*, p. 238.
3. James F. Challey, "Nicolas Léonard Sadi Carnot," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 3, 1971, p. 81.
4. Edward E. Darb, "Rudolf Clausius," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 3, 1971, p. 303.
5. *Ibid.*, p. 306.
6. *Ibid.*, p. 307.
7. *Ibid.*, p. 309.
8. Sir Isaac Newton, *Optiks.* New York: Dover, 1952, p. 400.
9. F. W. Magie, *The Source Book in Physics.* New York: McGraw-Hill, 1935, p. 247.
10. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom.* New York: Basic Books, 1966, pp. 213–214.
11. Stephen G. Brush, "Ludwig Boltzmann," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 2, 1970, p. 266.
12. *Ibid.*, p. 262.
13. *Ibid.*, p. 263.
14. *Ibid.*, p. 264.
15. Martin J. Klein, "Josiah Willard Gibbs," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 5, 1972, p. 388.

CHAPTER 12

1. James Murphy, "Introduction," in Max Planck, *Where is Science Going?* New York: W. W. Norton, 1932, p. 18.
2. *Ibid.*, pp. 19–20.
3. Albert Einstein, "Prologue," in Planck, *supra* note 1, p. 12.
4. *Ibid.*, p. 20.
5. Max Planck, "Scientific Autobiography," *Scientific Autobiography and Other Papers.* New York: Philosophical Library, 1949, p. 14.
6. *Ibid.*, p. 15.
7. *Ibid.*, p. 16.
8. *Ibid.*, p. 20.
9. *Ibid.*, p. 21.

10. Max Planck, *The Universe in Light of Modern Physics*. New York: W. W. Norton, 1931, p. 82.
11. *Ibid.*, p. 30.
12. *Ibid.*, p. 32.
13. *Ibid.*, pp. 33–34.
14. Max von Laue, "Memorial Address," in Planck, *supra* note 5, p. 8.
15. James Murphy, "Introduction," in Planck, *supra* note 1, p. 37.

CHAPTER 13

1. *Nobel Lectures: Physics 1901–1921*. New York: Elsevier Publishing Co., 1967, p. 97.
2. "John William Strutt, Lord Rayleigh," *Encyclopaedia Britannica*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, Inc., Vol. 15, 1978, p. 538.
3. *Nobel Lectures, op. cit.*, p. 97.
4. *Ibid.*, p. 98.

CHAPTER 14

1. *Nobel Lectures: Physics 1901–1921*. New York: Elsevier Publishing Co., 1967, p. 31.
2. *Ibid.*, p. 32.
3. Alfred Romer, "Henri Becquerel," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1970, Vol. 2, p. 558.
4. *Ibid.*, pp. 558–559.
5. Adrienne R. Weill, "Marie Curie," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 3, 1971, p. 500.
6. *Ibid.*, p. 501.
7. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 430.
7. *Ibid.*, p. 502.
8. Albert Einstein, *Out of My Later Years*. New York: Philosophical Library, 1950, pp. 227–228.
9. Boorse and Motz, *op. cit.*, p. 438.
10. *Ibid.*, p. 439.
11. *Ibid.*, p. 449.
12. *Ibid.*, p. 450.
13. *Ibid.*, p. 451.
14. *Ibid.*, p. 641.
15. *Ibid.*, p. 701.
16. *Ibid.*, p. 702.
17. *Ibid.*, p. 703.
18. *Ibid.*, pp. 704–705.
19. *Ibid.*, p. 804.
20. *Ibid.*, p. 805.
21. *Ibid.*, p. 806.

CHAPTER 15

1. Ronald W. Clark, *Einstein: The Life and Times*. New York: Avon Books, 1984, p. 25.
2. *Ibid.*, p. 27.
3. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 534.
4. Clark, *op. cit.*, p. 66.
5. *Ibid.*, p. 87.
6. Boorse and Motz, *op. cit.*, pp. 535–536.
7. Clark, *op. cit.*, p. 252.
8. *Ibid.*, p. 313.

CHAPTER 16

1. Leon Rosenfeld, "Niels Henrik David Bohr," *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 2, 1970, p. 240.
2. *Ibid.*, p. 241.
3. *Ibid.*, p. 244.
4. *Ibid.*, p. 248.
5. *Ibid.*, p. 250.
6. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 739.

CHAPTER 17

1. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 1047.
2. *Ibid.*, p. 1105.
3. *Ibid.*, p. 1106.
4. *Ibid.*, p. 1107.
5. *Ibid.*, p. 1065.
6. *Ibid.*, p. 1066.
7. *Ibid.*, p. 1529.
8. *Ibid.*, p. 1530.
9. "Richard Phillips Feynman," *McGraw-Hill Modern Men of Science*. New York: McGraw-Hill, 1966, p. 170.

CHAPTER 18

1. Henry A. Boorse and and Lloyd Motz, *The World of the Atom*. New York: Basic Books, 1966, p. 1319.
2. *Ibid.*, pp. 1319–1320.

3. Emilio Segrè, "Enrico Fermi," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 4, 1971, p. 577.
4. Boorse and Motz, *op. cit.*, p. 1320.
5. Segrè, *op. cit.*, p. 577.
6. *Ibid.*, p. 578.
7. *Ibid.*, p. 579.
8. *Ibid.*, p. 580.
9. "Enrico Fermi," *Biographical Encyclopedia of Scientists.* New York: Facts on File, Inc., 1981, p. 258.

CHAPTER 19

1. Henry A. Boorse and Lloyd Motz, *The World of the Atom.* New York: Basic Books, 1966, p. 1760.
2. *Ibid.*, p. 1761.
3. "Robert Hofstadter," *McGraw-Hill Modern Men of Science.* New York: McGraw-Hill, 1966, p. 239.
4. Isaac Asimov, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology,* 2nd ed. Garden City, New York: Doubleday & Co., Inc., 1982, p. 854.
5. "Robert Hofstadter," *op. cit.*, p. 239.
6. Asimov, *op. cit.*, p. 854.
7. "Robert Hofstadter," *op. cit.*, p. 239.
8. "Murray Gell-Mann," *McGraw-Hill Modern Men of Science.* New York: McGraw-Hill, 1966, p. 188.
9. *Ibid.*, p. 189.
10. *Ibid.*, p. 190.

CHAPTER 20

1. A. Vibert Douglas, "Arthur Stanley Eddington," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 4, 1971, p. 278.
2. James R. Newman, *The World of Mathematics.* New York: Simon & Schuster, 1956, p. 1069.
3. Douglas, *op. cit.*, p. 279.
4. *Ibid.*, p. 280.
5. "John Archibald Wheeler," *McGraw-Hill Modern Men of Science.* New York: McGraw-Hill, 1968, p. 590.
6. *Ibid.*, p. 591.
7. *Ibid.*, p. 593.
8. G. J. Whitrow, "Edwin Powell Hubble," *Dictionary of Scientific Biography.* New York: Charles Scribner's Sons, Vol. 5, 1972, p. 528.
9. *Ibid.*, p. 529.
10. *Ibid.*, p. 530.
11. *Ibid.*, p. 531.
12. *Ibid.*, p. 532.

المحتوى

قصة الفيزياء = The Story of physics / لويد موتز ، جيفرسن هان ويفر ؛ ترجمه عن الإنكليزية طاهر تربدار ووائل الأتاسي . ـــ دمشق : دار طلاس ، ١٩٩٤ . ـــ ٣٩٧ص : مص ؛ ٢٤سم .

صدر بالتعاون مع المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا .

١ ـــ ٥٣٠ م و ت ق ٢ ـــ العنوان ٣ ـــ العنوان الموازي ٤ ـــ موتز ٥ ـــ ويفر ٦ ـــ تربدار ٧ ـــ الأتاسي

مكتبة الأسد

رقم الإيداع ١٩٩٤/٦/٦٤٣ رقم الإصدار ٦٣٦

موافقة وزارة الاعلام
رقم : ٢٢٧٤٨
تاريخ : ١٩٩٣/١١/١٤

يتضمن هذا الكتاب في عرضه لتطور الفيزياء وازدهارها أمرين: أحدهما حياة العلماء الذين اكتشفوا المبادئ التي قامت عليها الفيزياء الأساسية وطوروها، والثاني طريقة اكتشاف هذه المبادئ وافتراضها. ولا بد للمرء أن يعجب عند دراسته حياة هؤلاء العلماء المكتشفين كيف يتفانون في سبيل دوافعهم الداخلية التي لا تخمد وحاجتهم لسبر الطبيعة واكتشاف ما يتحكم بها.

ولكن أن يكون المرء رائداً في العلم يتطلب جرأة لا حد لها تجعله يصر على وجهة نظره حتى لو لم تكن على وفاق مع وجهات النظر السائدة في زمانها. والخوض في قصة الفيزياء هو الخوض في قصة شجاعةٍ كانت طبيعة بارزة لدى كل شخصيات هذه القصة...



